

# OPTICAL WAVEGUIDE, OPTICAL WAVELENGTH CONVERSION ELEMENT AND METHOD FOR MANUFACTURING THE SAME AS WELL AS SHORT WAVELENGTH GENERATOR, OPTICAL INFORMATION PROCESSOR, COHERENT LIGHT GENERATOR AND OPTICAL SYSTEM USING THE SAME

Publication number: JP2001194694

Publication date: 2001-07-19

Inventor: MIZUUCHI KIMINORI; YAMAMOTO KAZUHISA;  
KITAOKA YASUO; YOKOYAMA TOSHIFUMI

Applicant: MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

Classification:

- international: G02B6/122; G02B6/12; G02B6/13; G02F1/377;  
G11B7/135; G02B6/122; G02B6/12; G02B6/13;  
G02F1/35; G11B7/135; (IPC1-7): G02F1/377;  
G02B6/12; G02B6/122; G02B6/13; G11B7/135

- European:

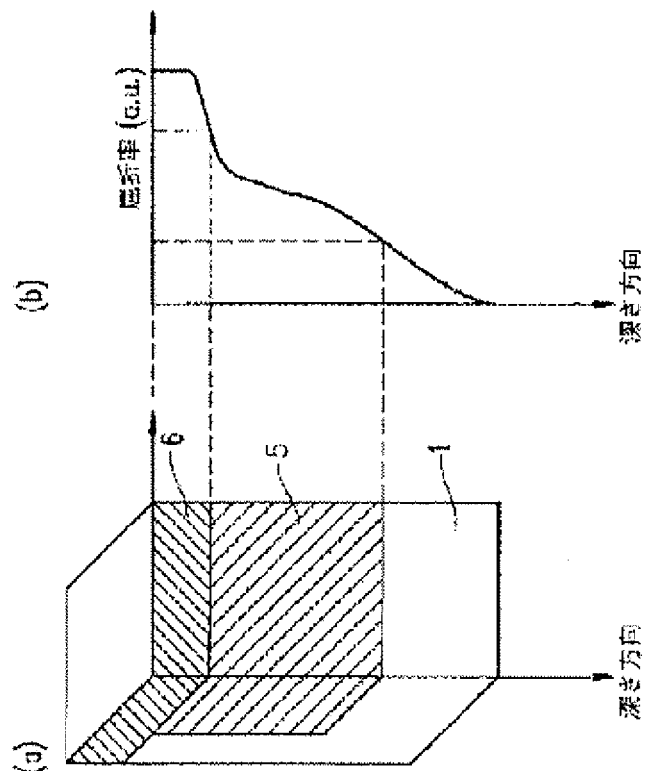
Application number: JP20000083005 20000323

Priority number(s): JP20000083005 20000323; JP19990078706 19990323;  
JP19990303177 19991025

Report a data error here

## Abstract of JP2001194694

PROBLEM TO BE SOLVED: To make output stable by realizing the higher efficiency and light damage resistant strength of an optical wavelength conversion element of a waveguide type. SOLUTION: The optical waveguide has a nonlinear optical crystal, a first ion exchange region formed near the surface of this nonlinear optical crystal and a second ion exchange region formed near the surface of the first ion exchange region. The second ion exchange region has a refractive index higher than the refractive index of the first ion exchange region and the refractive index distribution of the second ion exchange region has a step-like graded shape.



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-194694

(P2001-194694A)

(43)公開日 平成13年 7月19日 (2001. 7. 19)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード(参考)		
G 0 2 F	1/377	C 0 2 F	1/377	2 H 0 4 7	
G 0 2 B	6/122	C 1 1 B	7/135	A	2 K 0 0 2
	6/13	G 0 2 B	6/12	A	5 D 1 1 9
	6/12			M	
G 1 1 B	7/135			J	

審査請求 未請求 請求項の数48 O L (全 38 頁)

(21)出願番号 特願2000-83005(P2000-83005)

(22)出願日 平成12年 3月23日 (2000. 3. 23)

(31)優先権主張番号 特願平11-78706

(32)優先日 平成11年 3月23日 (1999. 3. 23)

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(31)優先権主張番号 特願平11-303177

(32)優先日 平成11年10月25日 (1999. 10. 25)

(33)優先権主張国 日本 (J P)

(71)出願人 000003821

松下電器産業株式会社

大阪府門真市大字門真1006番地

(72)発明者 水内 公典

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

(72)発明者 山本 和久

大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

(74)代理人 100078282

弁理士 山本 秀策

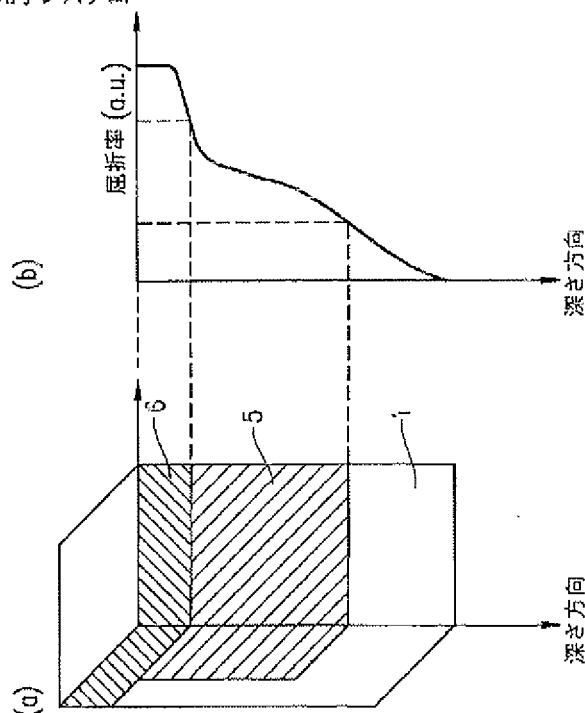
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光導波路、光波長変換素子及びその製造方法、並びにそれらを使用した短波長光発生装置、光情報処理装置、コヒーレント光発生装置、光学システム

(57)【要約】

【課題】 導波路型の光波長変換素子における高効率化と耐光損傷強度の向上とを実現して、出力の安定化を図る。

【解決手段】 光導波路が、非線形光学結晶と、該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、該第2のイオン交換領域は、該第1のイオン交換領域よりも高い屈折率を有し、該第2のイオン交換領域の屈折率分布がステップライクなグレーデッド形状を有している。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 非線形光学結晶と、  
該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、  
該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、  
該第2のイオン交換領域は、深さ方向にイオン交換率が変化している領域が、 $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ である、光導波路。

【請求項2】 前記第2のイオン交換領域はイオン交換率の変化量が $5 \sim 50 \mu\text{m}^{-1}$ の領域を $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ に渡って有する、請求項1に記載の光導波路。

【請求項3】 前記第1のイオン交換領域はイオン交換率の変化量が $0.06 \mu\text{m}^{-1}$ 以下である、請求項1或いは請求項2に記載の光導波路。

【請求項4】 前記第2のイオン交換領域は深さ方向にイオン交換率が変化している領域が、 $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ である、請求項1に記載の光導波路。

【請求項5】 前記第2のイオン交換領域はイオン交換率の変化量が $10 \sim 30 \mu\text{m}^{-1}$ である、請求項1に記載の光導波路。

【請求項6】 前記第1のイオン交換領域の非線形光学定数が前記結晶の非線形光学定数の90%以上であり、前記第2のイオン交換領域の非線形光学定数は該結晶の非線形光学定数の60%以下である、請求項1に記載の光導波路。

【請求項7】 前記第1のイオン交換領域の表面屈折率変化 $\Delta n$ は波長 $633 \text{nm}$ の光に対し $0.02$ 以下であり、前記第2のイオン交換領域の表面屈折率変化 $\Delta n$ は $0.11$ 以上である、請求項1に記載の光導波路。

【請求項8】 非線形光学結晶と、  
該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、  
該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、  
該第2のイオン交換領域は、該第1のイオン交換領域よりも高い屈折率を有し、該第2のイオン交換領域の屈折率分布がステップライクなグレーディッド形状を有して

いる、光導波路。

【請求項9】 非線形光学結晶と、  
該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、  
該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、  
該第2のイオン交換領域は、該第1のイオン交換領域よりも高いイオン濃度を有し、該第2のイオン交換領域のイオン濃度分布がステップライクなグレーディッド形状を有している、光導波路。

【請求項10】 前記第1のイオン交換領域と前記第2のイオン交換領域とは、異なる温度におけるアニール処理により得られた異なるグレーディッドな形状を有している、請求項8または9に記載の光導波路。

【請求項11】 前記第1のイオン交換領域の深さは、アニール処理により、該アニール処理の実施前における値の8倍以上に拡大している、請求項8から10のいずれかに記載の光導波路。

【請求項12】 前記第2のイオン交換領域の深さは、アニール処理により、該アニール処理の実施前における値の1.2倍以上に拡大している、請求項8から11の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項13】 前記第2のイオン交換領域の深さは、アニール処理により、該アニール処理の実施前における値の2倍以上に拡大している、請求項8から11の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項14】 前記第2のイオン交換領域の表面屈折率は、アニール処理の実施前における表面屈折率の値とほぼ等しい、請求項8または10から13の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項15】 前記第2のイオン交換領域の表面イオン濃度は、アニール処理の実施前における表面イオン濃度の値とほぼ等しい、請求項9から13の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項16】 前記第2のイオン交換領域の屈折率分布の前記ステップライクなグレーディッド形状は、以下の(1)及び(2)の関係：

【数1】

$$C(k,t) = C_0 \times 0.5 \times \left\{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{D_p \times t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{D_p \times t}] \right\} \quad (1)$$

(但し、 $C(k, t)$ ：イオン交換濃度、 $k$ ：深さ( $\mu\text{m}$ )、 $t$ ：アニール時間(時間)、 $C_0$ ：初期のイオン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$ ：エラー関数、 $h$ ：初期のイオン交換深さ( $\mu\text{m}$ )、及び、 $D_p$ ：アニール処理によるイオンの拡散定数( $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ )、

【数2】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{D_p \times t} < 20 \quad (2)$$

を満たすアニール処理によって形成される、請求項8または10から14の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項17】 前記第2のイオン交換領域のイオン濃度分布の前記ステップライクなグレーディッド形状は、以下の(1)及び(2)の関係：

【数3】

$$C(k,t)=C0 \times 0.5 \times \left\{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{Dp \times t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{Dp \times t}] \right\} \quad (1)$$

(但し、 $C(k, t)$ :イオン交換濃度、 $k$ :深さ( $\mu\text{m}$ )、 $t$ :アニール時間(時間)、 $C0$ :初期のイオン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$ :エラー関数、 $h$ :初期のイオン交換深さ( $\mu\text{m}$ )、及び、 $Dp$ :アニール処理によるイオンの拡散定数( $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ )、

【数4】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{Dp \times t} < 20 \quad (2)$$

を満たすアニール処理によって形成される、請求項9から13または15の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項18】 前記非線形光学結晶が $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 結晶( $0 \leq x \leq 1$ )である、請求項8から17の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項19】 前記第1のイオン交換領域及び前記第2のイオン交換領域を形成するイオン交換処理が、それぞれプロトン交換処理である、請求項8から18の何れか一つに記載の光導波路。

【請求項20】  $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )からなる前記非線形光学結晶の表面にイオン交換により形成され、該光導波路内の $\text{Li}$ の $\text{mol}$ 濃度比が40 $\text{mol}\%$ 以上である、請求項1、8または9のいずれかに記載の光導波路。

【請求項21】  $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )からなり、少なくとも表面近傍に金属元素が添加された前記非線形光学結晶の該表面に、イオン交換により形成され、該光導波路内の $\text{Li}$ の $\text{mol}$ 濃度比 $Y$ と該金属元素の $\text{mol}$ 濃度 $Z$ が $Y+Z \geq 45\text{mol}\%$ である、請求項1、8または9のいずれかに記載の光導波路。

【請求項22】 請求項1から21の何れか一つに記載の光導波路と、周期状の分極反転構造と、を備え、該光導波路は、波長 $\lambda$ の基本波及び波長 $\lambda/2$ の第2高調波の導波が可能で、該光導波路に含まれる前記第2のイオン交換領域の屈折率及び深さは、該第2高調波に対しては導波条件を満足し、且つ該基本波に対してはカットオフ条件を満足している、光波長変換素子。

【請求項23】 前記光導波路において基本モードの基本波と高次モードの第2高調波とが位相整合している、請求項22に記載の光波長変換素子。

【請求項24】 非線形光学結晶の表面に隣接する複数の光導波路から構成される光導波路群を有し、該光導波路群内で入射された基本波を異なる波長の光に変換する光波長変換素子であって、該基本波が該光導波路群をシングルモード伝搬し、かつ、変換された波長光が該光導波路群を構成する光導波路を導波モードで伝搬するか、変換された波長光が該光導波路群をシングルモード伝搬

し、かつ、該基本波が該光導波路群を構成する光導波路を伝搬する光波長変換素子。

【請求項25】 前記光導波路群は、伝搬方向が異なる複数の光導波路から構成されている請求項24記載の光波長変換素子。

【請求項26】 前記光導波路は、前記基本波および変換された波長光のうちのいずれか一方の光に対してカットオフ条件を満たし、他方の光に対しては導波条件を満たす請求項24または請求項25記載の光波長変換素子。

【請求項27】 前記光導波路のうちの少なくとも1本は、他の光導波路と異なる伝搬定数を有する請求項24から26のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項28】 前記光導波路群は、前記基本波および変換された波長光のうちのいずれか一方の光に対してシングルモード伝搬条件を満たし、該一方の光と、前記光導波路のうちのいずれか1本を導波する他方の光との間で位相整合する請求項24から27のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項29】 前記光導波路群は奇数本の光導波路から構成され、中央の光導波路を中心として中心対称の構造を有する請求項24から28のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項30】 前記光導波路群は伝搬方向がほぼ等しい3本の光導波路から構成され、中央の光導波路が両側の光導波路とは異なる伝搬定数を有し、該光導波路群をシングルモード伝搬する基本波および変換された波長光のうちのいずれか一方の光と、該光導波路群の中央の光導波路を伝搬する他方の光との間で位相整合する請求項24から29のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項31】 前記光導波路群は、前記入射部近傍および出射部近傍の少なくともいずれか一方において、前記光導波路の本数が異なる請求項24から30のいずれかに記載の光波長変換素子。

【請求項32】  $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )からなる結晶の表面にイオン交換により形成した光導波路を有し、該光導波路内の $\text{Li}$ の $\text{mol}$ 濃度比が40 $\text{mol}\%$ 以上である光波長変換素子。

【請求項33】  $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )からなり、少なくとも表面近傍に金属元素が添加された結晶の該表面に、イオン交換により形成した光導波路を有し、該光導波路内の $\text{Li}$ の $\text{mol}$ 濃度比 $Y$ と該金属元素の $\text{mol}$ 濃度 $Z$ が $Y+Z \geq 45\text{mol}\%$ である光波長変換素子。

【請求項34】 前記金属元素が $\text{Mg}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Sc}$ および $\text{In}$ のうちのいずれか1種類であるか、または2種類以上を混合したものである請求項33に記載の光波長変換素子。

換素子。

【請求項35】 半導体レーザと、請求項22から34のいずれかに記載の光波長変換素子と、を備え、該半導体レーザから出射された光の波長が該光波長変換素子により所定の高調波に変換される、短波長光発生装置。

【請求項36】 前記光波長変換素子による変換で得られる前記高調波の導波モードが高次モードであり、該高調波の高次モードの強度分布が有する複数のピークにおいて、最大強度を有するメインピーク以外のサブピークの一つの幅が、該高調波に対する回折限界より小さい、請求項35に記載の短波長光発生装置。

【請求項37】 前記高調波の高次モードが1次モードである、請求項36に記載の短波長光発生装置。

【請求項38】 前記高調波の高次モードがTE10モードである、請求項36或いは37に記載の短波長光発生装置。

【請求項39】 請求項35から38の何れか一つに記載の短波長光発生装置と、集光光学系と、を備え、該短波長光発生装置から出射される短波長光を該集光光学系により集光するように構成されている、光情報処理装置。

【請求項40】 非線形光学結晶に周期的な分極反転構造を形成する工程と、

該分極反転構造に第1のイオン交換領域を形成する工程と、  
該第1のイオン交換領域に対する第1のアニール処理を行う工程と、

該第1のイオン交換領域の表面に第2のイオン交換領域を形成する工程と、

該第2のイオン交換領域に対する第2のアニール処理を行う工程と、を包含し、

該第1のアニール処理を行う第1のアニール温度と該第2のアニール処理を行う第2のアニール温度とが異なっている、光波長変換素子の製造方法。

【請求項41】 前記第1のアニール温度が300℃以上であり、前記第2のアニール温度が250℃以下である、請求項40に記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項42】 前記分極反転構造を形成する工程は、形成された分極反転構造を400℃以上の温度で熱処理する工程を含む、請求項40或いは41に記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項43】 前記第2のアニール温度が130℃～200℃の範囲である、請求項40から42の何れか一つに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項44】 前記第2のアニール処理は、以下の(1)及び(2)の関係：

【数5】

$$C(k,t)=C0 \times 0.5 \times \left\{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{Dp \times t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{Dp \times t}] \right\} \quad (1)$$

(但し、 $C(k, t)$ ：イオン交換濃度、 $k$ ：深さ( $\mu\text{m}$ )、 $t$ ：アニール時間(時間)、 $C0$ ：初期のイオン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$ ：エラー関数、 $h$ ：初期のイオン交換深さ( $\mu\text{m}$ )、及び、 $Dp$ ：アニール処理によるイオンの拡散定数( $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ )、

【数6】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{Dp \times t} < 20 \quad (2)$$

を満たすアニール処理であり、これによって形成される前記第2のイオン交換領域の屈折率分布がステップライクなグレーディッド形状を有している、請求項40から43の何れか一つに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項45】 前記非線形光学結晶が $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 結晶( $0 \leq x \leq 1$ )である、請求項40から44の何れか一つに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項46】 前記第1のイオン交換領域及び前記第2のイオン交換領域を形成するイオン交換処理が、それぞれプロトン交換処理である、請求項40から45の何れか一つに記載の光波長変換素子の製造方法。

【請求項47】 請求項24から34のいずれかに記載の光波長変換素子と、半導体レーザとを備え、該半導体レーザの光を該光波長変換素子によって波長変換するコヒーレント光発生装置。

【請求項48】 請求項47に記載のコヒーレント光発生装置と、集光光学系とを備え、前記光波長変換素子から出射された光を該集光光学系で集光する光学システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、コヒーレント光源を応用して光情報処理分野や光応用計測分野にて使用される光導波路とそれを使用した光波長変換素子、及びこれらを使用して構成される短波長光発生装置及び光情報処理装置、並びにこれらの製造方法に関する。本発明は、さらに、光情報処理分野や光応用計測分野等に利用される光波長変換素子およびコヒーレント光発生装置、並びにそのコヒーレント光発生装置を用いた光学システムに関する。

【0002】

【従来の技術】光導波路は、光波制御技術として、通信、光情報処理、計測などの広い分野で応用されている。中でも光導波路の光波長変換素子への適用は、半導体レーザの波長変換による小型の短波長光源を実現できるために、盛んに研究が行われている。

【0003】まず最初に、従来の光波長変換素子600について、図24(a)及び(b)を参照して説明す

る。図24(a)は、従来の光波長変換素子600の構成例を示す斜視図であり、図24(b)は、図24(a)の波長変換素子600に入射される基本波P1が高調波P2に変換される様子を模式的に示す図である。

【0004】図24(a)に示される従来の光波長変換素子600では、例えば特開平5-273624号公報にて教示されているように、光導波路の表面近傍に非線形劣化層を設けて、光波長変換素子の動作の高効率化及び安定化を図っている。具体的には、図24(a)において、601はLiTaO<sub>3</sub>基板、602は光導波路、603は分極反転領域、605は非線形劣化層である。

【0005】図24(a)の光波長変換素子600の光導波路602に入射されたTM00モードの基本波P1は、図24(b)に示すように、分極反転領域603が周期的に形成されている光導波路602の内部を伝搬する間に、TM10モードの高調波P2に波長変換される。なお、典型的には、非線形劣化層605の厚さは約0.45μmであり、光導波路602の厚さは1.8μmである。

【0006】TM10モードの高調波P2は、図24(b)に示すように、+E側及び-E側にはほぼ同程度の大きさのピーク出力を持っている。このような強度分布を有するTM10モードの高調波P2と、TM00モードの基本波P1との間でオーバーラップの増大を図ることによって、波長変換動作の高効率化が達成されている。更に、波長変換によって得られる高調波P2をTM10モードにすることで、パワー密度の分散を図ることができる。これによって、高い高調波出力に対しても、光損傷の発生を抑えることができる。

【0007】従来技術による他の光波長変換素子の構成として、光導波路よりも高い屈折率を有する高屈折率層を光導波路上に形成する構成が、例えば特開平4-254834号公報に報告されている。図25(a)は、このような高屈折率層を有する従来の光波長変換素子640の構成を示す斜視図であり、図25(b)は、図25(a)の波長変換素子に入射される基本波P1の光導波路への閉じ込めの様子を模式的に示す図である。

【0008】図25(a)に示す光波長変換素子640では、LiNbO<sub>3</sub>基板641の上に形成されたプロトン交換光導波路642の一方の端面645に入射された基本波P1は、分極反転領域644が周期的に設けられている光導波路642の中を伝搬する間に波長変換されて、光導波路642の他方の端面646からは高調波P2が出力される。

【0009】更に図25(a)の構成では、光導波路642の表面に、TiO<sub>2</sub>高屈折率層643が形成されている。高屈折率層643を構成するTiO<sub>2</sub>の屈折率は、プロトン交換光導波路642の屈折率よりも大きく、このように屈折率の高い高屈折率層643を光導波路642の上に形成することにより、図25(b)に示すよ

うに、光導波路642(より厳密にはその中の分極反転領域644)への基本波P1の閉じ込めを強くして、光波長変換素子の波長変換動作の高効率化を達成している。

【0010】この他の従来の光波長変換素子の光導波路の構造として、光導波路の閉じ込めを強化するためにリッジ型の光導波路構造を採用した光波長変換素子が、例えば特開平1-238631号公報にて報告されている。

【0011】或いは、光導波路の表面に光導波路よりも高い屈折率を有する高屈折率クラッド層を設けて、光導波路を伝搬する基本モードの基本波と高次モードの高調波との間で位相整合をとることで導波光間のオーバーラップを増大させ、高効率の波長変換を実現する波長変換素子の構成も提案されている。

【0012】特開平9-281536号公報では、プロトン交換処理及びアニール処理により形成したプロトン交換光導波路の表面に更に第2のプロトン交換領域を形成して、光導波路を伝搬する基本波を高次の導波モードを有する第2高調波に波長変換する方法が報告されている。

【0013】また、非線形光学効果を利用した光波長変換素子は、光の波長変換による第2高調波発生、パラメトリック発生、和周波発生および差周波発生等、コヒーレント光の発生範囲の拡大を図ることが可能となるため、多くの分野で応用されている。特に、光導波路を利用した光波長変換素子では、光の閉じ込め効果により高いパワー密度を実現することができ、長い相互作用長を得ることができる等の利点を有している。これらの利点により高効率の波長変換が可能となるため、光導波路を利用した光波長変換素子として、多くの光デバイスが提案されている。

【0014】光導波路を利用した光波長変換素子においては、光損傷が大きな問題になっていた。ここで述べる光損傷とは光誘起屈折率変化のことであり、光導波路の様な光の閉じ込めの強い部分では、光のパワー密度が高いため、光によって導波路の屈折率が変化するという現象(光損傷)が発生する。この光損傷が発生すると、屈折率変化によって位相整合状態が変化するため、光波長変換素子の出力が変動する。これが光導波路型の光波長変換素子の高出力化を妨げる問題となっている。特に、非線形光学定数の大きなLiNbO<sub>3</sub>やLiTaO<sub>3</sub>等の基板において、光損傷の発生が顕著であり、数mW~数10mWの出力に対して光損傷が発生している。この光損傷の低減のためには、結晶内の不純物の低減、および光導波路の低損失化が有効である。

【0015】従来、光損傷の問題を解決する方法としては、LiNbO<sub>3</sub>基板にZn、Mg、ScやIn等の金属元素をドーピングすることで、基板自体の耐光損傷強度を向上させる方法が提案されている。この方法によれ

ば、基板に5m $\phi$ 程度の金属を添加することにより、基板を構成する結晶自体の耐光損傷強度が1桁以上向上する。

【0016】一方、光導波路を利用した光波長変換素子（光導波路型的光波長変換素子）において、基本波を高調波に波長変換する変換効率を向上させるためには、伝搬する基本波のパワー密度を増大させること、および変換された高調波と基本波の電界分布のオーバーラップを増大させることが必要不可欠である。

【0017】光導波路を用いた光波長変換素子において、図26に示すような複数の光導波路を利用した光波長変換素子160が提案されている。この光波長変換素子160では、LiNbO<sub>3</sub>基板の表面に隣接する2本の光導波路151をプロトン交換により形成し、2本の光導波路151を共に伝搬する基本波P<sub>0</sub>152と、チェレンコフ放射する高調波P<sub>2</sub>153との間で位相整合をとっている。2本の光導波路151の間の中央部はプロトン交換されていないため、高い非線形光学効果を有しており、これによって高非線形光導波路の形成が可能となる。その結果、チェレンコフ放射型光波長変換素子において、変換効率の高効率化を図ることができる。

【0018】さらに、複数の光導波路間の結合を利用した光波長変換素子の構成についても、例えば特開平3-261924号公報や特開平5-188420号公報等において提案されている。この構成では、基板表面に分極反転構造と、基本波が伝搬する光導波路と、高調波が伝搬する光導波路とを形成し、基本波と高調波とで異なる光導波路を伝搬させることにより、耐光損傷強度と変換効率の向上を実現している。

【0019】

【発明が解決しようとする課題】上記のような従来の光波長変換素子における課題を、以下に説明する。

【0020】従来の光波長変換素子600として図24(a)に示した構成では、先に説明したように、光導波路602の表面近傍に非線形劣化層605を設けて、TM00モードの基本波P1とTM10モードの高調波P2との間で位相整合をとり、それによって波長変換動作の高効率化と耐光損傷強度の向上とを図っている。しかし、この従来の構成では、図24(b)に示すように、出射されるTM10モードの高調波光P2が+E側及び-E側の2つのピークを有する強度分布を持つために、集光する際に集光特性が劣化するという課題がある。

【0021】この従来の方式において、出力する高調波P2が2つのほぼ等しい大きさのピークを有するのは、耐光損傷強度を高めるために、高調波P2を高次モードのピークに分散させているためである。しかし、このような強度分布を有する高調波出力を集光するためには特別な光学系が必要であるため、光学系が複雑化して、その小型化が難しい。また、回折限界まで集光するにはビームをかなり整形する必要があるため、出力光の利用効率が

50%以下に低下するという課題も存在する。

【0022】更に、非線形劣化層605は、基本波P1の閉じこめを高める機能を有さないため、基本波P1のパワー密度の増大が図れず、高効率化に限界がある。

【0023】また、光導波路642より高い屈折率の高屈折率層643を形成することにより光導波路642の閉じ込めを強化して、高効率化を図る構成を有する従来の光波長変換素子640に関しては、光導波路642の表面に形成する高屈折率層643として高屈折率の誘電体膜を使用している点に問題がある。すなわち、光導波路642の上の高屈折率層643は、光導波路642の実効屈折率に与える影響が大きく、光導波路642の全域に渡る膜厚の均一性に高い精度が要求される。例えば、光波長変換素子の場合、光導波路全長における位相整合条件は光導波路の実効屈折率に厳しく依存するため、光導波路の実効屈折率が伝搬方向に僅かでも変化すると、波長変換効率が極端に減少する。このため、高屈折率層643の膜厚制御には、厳しい均一性が要求される。

【0024】また、上記の構成では、基板641と異なる材質を光導波路642の表面に堆積するので、光導波路642と高屈折率膜643との界面において導波損失が生じ易い。更に、高屈折率膜643と基板641との膨張係数の違いによって光導波路642に歪みを与えられると、光導波路642の実効屈折率が、その伝搬方向に分布を持つ。

【0025】更に、光導波路642を伝搬する光に対する高屈折率層643の伝搬損失が大きな問題となることが、明らかになってきている。

【0026】一般に、光波長変換素子の特性を劣化させる光導波路の伝搬損失は、高調波に対する損失と基本波に対する損失とがある。誘電体の高屈折率層643は、基本波に与える伝搬損失は比較的小さく、問題は無いが、波長が短い高調波に対しては、従来の高屈折率膜643はかなり大きな伝搬損失を与えることが明らかになってきている。例えば、具体的な実験により、各種の高屈折率を有する誘電体膜が、波長400nm帯の高調波に対して数dB/cmという大きな伝搬損失を有することが明らかになった。これにより、光波長変換素子の波長変換効率が1/2以下に低減されていることが分かった。

【0027】更に、非線形劣化層を有する従来の構成では、非線形劣化層は基本波の閉じこめを高める機能を有さないため、基本波のパワー密度の増大が図れず、高効率化に限界がある。

【0028】また、先に説明した従来の光波長変換素子の構成では、光導波路を伝搬する基本モードの基本波と第2高調波とのオーバーラップの向上を目的としている。しかし、基本波と第2高調波との屈折率分散の違いより光導波路内での導波モードの分布が大きく異なるため、

両モード間でのオーバーラップの増大には制限があり、波長変換効率を大幅に向上させることは困難である。更に、基本波と第2高調波とがオーバーラップしない部分が大きいと、耐光損傷強度の向上を達成することは困難である。

【0029】また、リッジ型光導波路を用いて波長変換効率の向上を図っている従来の光波長変換素子では、光導波路の閉じ込め効果によるパワー密度の増大により、波長変換効率の向上を達成している。しかし、基本波に対するリッジ導波路による閉じ込め効果の増大は横方向（リッジの幅方向）に限られ、深さ方向の閉じ込めは向上しない。従って、波長変換効率への影響が最も大きな基本波と第2高調波のオーバーラップの増大（特に深さ方向のオーバーラップの増大）はリッジ構造では達成できず、波長変換効率の大幅な向上が困難である。

【0030】更に、装荷型光導波路についても、リッジ型と同様に、基本波と第2高調波との間のオーバーラップを十分に大きくできない。

【0031】また、従来の何れの方法においても、耐光損傷強度の観点から10mW程度の青色光の発生は可能であるが、出力が10mW以上になると、長時間の安定な出力を得るのが難しい。

【0032】更に、従来の光波長変換素子の構成として、光導波路の表面に高屈折率クラッドを形成することで高効率な波長変換特性を実現している構造がある。これは、光導波路の表面に光導波路より高い屈折率のクラッド層を設ける構成であって、クラッド層として、高屈折率な誘電体の膜、或いはイオン交換により形成された層が用いられている。この構成では高い波長変換効率と優れた光損傷特性とが得られるが、この構成においても、長期間の出力安定性を観測すると、出力が不安定になる新たな問題を有することが明らかになった。

【0033】また、上述したように、従来の光波長変換素子においては、基板の耐光損傷強度を向上させる方法として金属元素を添加する方法が提案されている。しかし、この方法では、プロトン交換等により光導波路を形成した場合には、導波路の耐光損傷強度を十分向上させることができないという問題があった。

【0034】図26に示した従来の光波長変換素子160においては、発生する高調波が放射モードであるために集光特性が悪く、回折限界までの集光を必要とするような光学システム等への応用は困難であった。また、導波モードで伝搬する基本波と放射モードで伝搬する高調波との間の位相整合条件が広い範囲で成立するため、高調波の伝搬モードを制御することが困難であり、高効率で波長変換可能な位相整合関係を選択することが難しいという問題があった。

【0035】さらに、特開平3-261924号公報や特開平5-188420号公報等のように、基本波と高調波とで異なる光導波路を伝搬させる構成では、それぞ

れの光導波路を伝搬する基本波と高調波とにおいて、電界分布のオーバーラップが小さい。このため、変換効率の高効率化を図るのが難しいという問題があった。

【0036】本発明は、以上のような課題を考慮して行われたものであって、その目的は、(1)優れた耐光損傷特性を有し、長時間の出力安定性を有する第2高調波出力が可能であり、且つ基本波と第2高調波とのオーバーラップを大きくした光波長変換素子の実現を可能にする光導波路、(2)その光導波路を利用して構成される光波長変換素子、(3)その光波長変換素子を利用して構成されている短波長光発生装置及び光情報処理装置、並びに(4)それらの製造方法、を提供することである。

【0037】さらに、本発明は、以上のような従来技術の課題を解決するためになされたものであり、耐光損傷強度が優れた光波長変換素子およびコヒーレント光発生装置並びに光学システムを提供することを目的とする。また、本発明は、基本波から高調波、パラメトリック、和周波や差周波等への波長変換を高効率に行うことが可能であり、ビーム特性を向上して集光特性に優れた変換波長光を発生させることができる光導波路型の光波長変換素子およびコヒーレント光発生装置並びに光学システムを提供することを目的とする。

【0038】

【課題を解決するための手段】本発明の光導波路は、非線形光学結晶と、該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、該第2のイオン交換領域は、深さ方向にイオン交換率が変化している領域が、 $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ であることにより、上記課題が達成される。

【0039】前記第2のイオン交換領域はイオン交換率の変化量が $5 \sim 50 \mu\text{m}^{-1}$ の領域を $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ に渡って有してもよい。

【0040】前記第1のイオン交換領域はイオン交換率の変化量が $0.06 \mu\text{m}^{-1}$ 以下であってもよい。

【0041】前記第2のイオン交換領域は深さ方向にイオン交換率が変化している領域が、 $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ であってもよい。

【0042】前記第2のイオン交換領域はイオン交換率の変化量が $10 \sim 30 \mu\text{m}^{-1}$ であってもよい。

【0043】前記第1のイオン交換領域の非線形光学定数が前記結晶の非線形光学定数の90%以上であり、前記第2のイオン交換領域の非線形光学定数は該結晶の非線形光学定数の60%以下であってもよい。

【0044】前記第1のイオン交換領域の表面屈折率変化 $\Delta n$ は波長633nmの光に対し0.02以下であり、前記第2のイオン交換領域の表面屈折率変化 $\Delta n$ は0.11以上であってもよい。

【0045】本発明の光導波路は、非線形光学結晶と、



該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、該第2のイオン交換領域は、該第1のイオン交換領域よりも高い屈折率を有し、該第2のイオン交換領域の屈折率分布がステップライクなグレーディッド形状を有していることにより、上記課題が達成される。

【0046】本発明の光導波路は、非線形光学結晶と、該非線形光学結晶の表面の近傍に形成された第1のイオン交換領域と、該第1のイオン交換領域の表面の近傍に形成された第2のイオン交換領域と、を備え、該第2のイオン交換領域は、該第1のイオン交換領域よりも高いイオン濃度を有し、該第2のイオン交換領域のイオン濃度分布がステップライクなグレーディッド形状を有していることにより、上記課題が達成される。

【0047】前記第1のイオン交換領域と前記第2のイオン交換領域とは、異なる温度におけるアニール処理により得られた異なるグレーディッドな形状を有しているもよい。

【0048】前記第1のイオン交換領域の深さは、アニール処理により、該アニール処理の実施前における値の8倍以上に拡大していてもよい。

【0049】前記第2のイオン交換領域の深さは、アニール処理により、該アニール処理の実施前における値の1.2倍以上に拡大していてもよい。

【0050】前記第2のイオン交換領域の深さは、アニール処理により、該アニール処理の実施前における値の2倍以上に拡大していてもよい。

【0051】前記第2のイオン交換領域の表面屈折率は、アニール処理の実施前における表面屈折率の値とほぼ等しくてもよい。

【0052】前記第2のイオン交換領域の表面イオン濃度は、アニール処理の実施前における表面イオン濃度の値とほぼ等しくてもよい。

【0053】前記第2のイオン交換領域の屈折率分布の前記ステップライクなグレーディッド形状は、以下の(1)及び(2)の関係：

【0054】  
【数7】

$$C(k,t)=C_0 \times 0.5 \times \left\{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{D_p t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{D_p t}] \right\} \quad (1)$$

【0055】(但し、 $C(k, t)$ ：イオン交換濃度、 $k$ ：深さ( $\mu\text{m}$ )、 $t$ ：アニール時間(時間)、 $C_0$ ：初期のイオン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$ ：エラー関数、 $h$ ：初期のイオン交換深さ( $\mu\text{m}$ )、及び、 $D_p$ ：アニール処理によるイオンの拡散定数( $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ )、

【0056】

【数8】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{D_p t} < 20 \quad (2)$$

$$C(k,t)=C_0 \times 0.5 \times \left\{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{D_p t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{D_p t}] \right\} \quad (1)$$

【0060】(但し、 $C(k, t)$ ：イオン交換濃度、 $k$ ：深さ( $\mu\text{m}$ )、 $t$ ：アニール時間(時間)、 $C_0$ ：初期のイオン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$ ：エラー関数、 $h$ ：初期のイオン交換深さ( $\mu\text{m}$ )、及び、 $D_p$ ：アニール処理によるイオンの拡散定数( $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ )、

【0061】

【数10】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{D_p t} < 20 \quad (2)$$

【0062】を満たすアニール処理によって形成されてもよい。

【0063】前記非線形光学結晶が $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ 結晶( $0 \leq x \leq 1$ )であってもよい。

【0064】前記第1のイオン交換領域及び前記第2のイオン交換領域を形成するイオン交換処理が、それぞれ

【0057】を満たすアニール処理によって形成されてもよい。

【0058】前記第2のイオン交換領域のイオン濃度分布の前記ステップライクなグレーディッド形状は、以下の(1)及び(2)の関係：

【0059】

【数9】

プロトン交換処理であってもよい。

【0065】 $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )からなる前記非線形光学結晶の表面にイオン交換により形成され、該光導波路内の $\text{Li}$ の $\text{mol}$ 濃度比が $40\text{mol}\%$ 以上であってもよい。

【0066】 $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )からなり、少なくとも表面近傍に金属元素が添加された前記非線形光学結晶の該表面に、イオン交換により形成され、該光導波路内の $\text{Li}$ の $\text{mol}$ 濃度比 $Y$ と該金属元素の $\text{mol}$ 濃度 $Z$ が $Y+Z \geq 45\text{mol}\%$ であってもよい。

【0067】本発明の光波長変換素子は、上記の何れか一つに記載の光導波路と、周期状の分極反転構造と、を備え、該光導波路は、波長 $\lambda$ の基本波及び波長 $\lambda/2$ の第2高調波の導波が可能で、該光導波路に含まれる前

記第2のイオン交換領域の屈折率及び深さは、該第2高調波に対しては導波条件を満足し、且つ該基本波に対してはカットオフ条件を満足していることにより、上記課題が達成される。

【0068】前記光導波路において基本モードの基本波と高次モードの第2高調波とが位相整合していてもよい。

【0069】本発明の光波長変換素子は、非線形光学結晶の表面に隣接する複数の光導波路から構成される光導波路群を有し、該光導波路群内で入射された基本波を異なる波長の光に変換する光波長変換素子であって、該基本波が該光導波路群をシングルモード伝搬し、かつ、変換された波長光が該光導波路群を構成する光導波路を導波モードで伝搬するか、変換された波長光が該光導波路群をシングルモード伝搬し、かつ、該基本波が該光導波路群を構成する光導波路を伝搬することにより、上記課題が達成される。

【0070】前記光導波路群は、伝搬方向が異なる複数の光導波路から構成されていてもよい。

【0071】前記光導波路は、前記基本波および変換された波長光のうちのいずれか一方の光に対してカットオフ条件を満たし、他方の光に対しては導波条件を満たしてもよい。

【0072】前記光導波路のうちの少なくとも1本は、他の光導波路と異なる伝搬定数を有してもよい。

【0073】前記光導波路群は、前記基本波および変換された波長光のうちのいずれか一方の光に対してシングルモード伝搬条件を満たし、該一方の光と、前記光導波路のうちのいずれか1本を導波する他方の光との間で位相整合してもよい。

【0074】前記光導波路群は奇数本の光導波路から構成され、中央の光導波路を中心として中心対称の構造を有してもよい。

【0075】前記光導波路群は伝搬方向がほぼ等しい3本の光導波路から構成され、中央の光導波路が両側の光導波路とは異なる伝搬定数を有し、該光導波路群をシングルモード伝搬する基本波および変換された波長光のうちのいずれか一方の光と、該光導波路群の中央の光導波路を伝搬する他方の光との間で位相整合してもよい。

【0076】前記光導波路群は、前記入射部近傍および出射部近傍の少なくともいずれか一方において、前記光導波路の本数が異なってもよい。

【0077】本発明の光波長変換素子は、 $\text{LiNb}_x\text{T}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) からなる結晶の表面にイオン交換により形成した光導波路を有し、該光導波路内のLiのmol濃度比が40mol%以上であることにより、上記課題が達成される。

【0078】本発明の光波長変換素子は、 $\text{LiNb}_x\text{T}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) からなり、少なくとも表面近傍

に金属元素が添加された結晶の該表面に、イオン交換により形成した光導波路を有し、該光導波路内のLiのmol濃度比Yと該金属元素のmol濃度Zが $Y+Z \geq 45\text{mol}\%$ であることにより、上記課題が達成される。

【0079】前記金属元素がMg、Zn、ScおよびInのうちのいずれか1種類であるか、または2種類以上を混合したものであってもよい。

【0080】本発明の短波長光発生装置は、半導体レーザと、上記のいずれかに記載の光波長変換素子と、を備え、該半導体レーザから出射された光の波長が該光波長変換素子により所定の高調波に変換されることにより、上記課題が達成される。

【0081】前記光波長変換素子による変換で得られる前記高調波の導波モードが高次モードであり、該高調波の高次モードの強度分布が有する複数のピークにおいて、最大強度を有するメインピーク以外のサブピークの一つの幅が、該高調波に対する回折限界より小さくてもよい。

【0082】前記高調波の高次モードが1次モードであってもよい。

【0083】前記高調波の高次モードがTE10モードであってもよい。

【0084】上記の何れか一つに記載の短波長光発生装置と、集光光学系と、を備え、本発明の光情報処理装置は、該短波長光発生装置から出射される短波長光を該集光光学系により集光するように構成されていることにより、上記課題が達成される。

【0085】本発明の光波長変換素子の製造方法は、非線形光学結晶に周期的な分極反転構造を形成する工程と、該分極反転構造に第1のイオン交換領域を形成する工程と、該第1のイオン交換領域に対する第1のアニール処理を行う工程と、該第1のイオン交換領域の表面に第2のイオン交換領域を形成する工程と、該第2のイオン交換領域に対する第2のアニール処理を行う工程と、を包含し、該第1のアニール処理を行う第1のアニール温度と該第2のアニール処理を行う第2のアニール温度とが異なっていることにより、上記課題が達成される。

【0086】前記第1のアニール温度が300℃以上であり、前記第2のアニール温度が250℃以下であってもよい。

【0087】前記分極反転構造を形成する工程は、形成された分極反転構造を400℃以上の温度で熱処理する工程を含んでもよい。

【0088】前記第2のアニール温度が130℃～200℃の範囲であってもよい。

【0089】前記第2のアニール処理は、以下の(1)及び(2)の関係：

【0090】

【数11】

$$C(k,t)=C0 \times 0.5 \times \{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{Dp \times t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{Dp \times t}] \} \quad (1)$$

【0091】(但し、 $C(k, t)$  : イオン交換濃度、 $k$  : 深さ ( $\mu\text{m}$ )、 $t$  : アニール時間 (時間)、 $C0$  : 初期のイオン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$  : エラー関数、 $h$  : 初期のイオン交換深さ ( $\mu\text{m}$ )、及び、 $Dp$  : アニール処理によるイオンの拡散定数 ( $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ )、

【0092】

【数12】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{Dp \times t} < 20 \quad (2)$$

【0093】を満たすアニール処理であり、これによって形成される前記第2のイオン交換領域の屈折率分布がステップライクなグレーディッド形状を有していてもよい。

【0094】前記非線形光学結晶が  $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  結晶 ( $0 \leq x \leq 1$ ) であってもよい。

【0095】前記第1のイオン交換領域及び前記第2のイオン交換領域を形成するイオン交換処理が、それぞれプロトン交換処理であってもよい。

【0096】本発明のコヒーレント光発生装置は、上記のいずれかに記載の光波長変換素子と、半導体レーザとを備え、該半導体レーザの光を該光波長変換素子によって波長変換することにより、上記課題が達成される。

【0097】本発明の光学システムは、上記に記載のコヒーレント光発生装置と、集光光学系とを備え、前記光波長変換素子から出射された光を該集光光学系で集光することにより、上記課題が達成される。

【0098】以下、本発明の作用について説明する。

【0099】本発明は、非線形光学効果を利用して光導波路を伝搬する基本波を高調波、パラメトリック、和周波や差周波等に波長変換する光波長変換素子において、耐光損傷強度の向上、波長変換効率の高効率化、および出射される光のビーム特性の向上を図るために、光波長変換素子を構成する光導波路を従来とは異なる特別な構造としたものである。

【0100】後述する第7の実施形態および第8の実施形態に示すように、非線形光学結晶の表面に、隣接する複数の光導波路からなる光導波路群を形成し、この光導波路群を利用して基本波から高調波、パラメトリック、和周波や差周波等への波長変換を実現する。この構成において、位相整合状態を制御することにより、光導波路群が、基本波と変換された波長光に対して異なる伝搬状態を与えることが可能となる。例えば、第7の実施形態に示すように、基本波は光導波路群をシングルモード伝搬させ、高調波や和周波は光導波路を導波モードで伝搬させることが可能となる。または、第8の実施形態に示すように、基本波は光導波路をシングルモード伝搬させ、パラメトリックや差周波は光導波路群をシングルモ

ード伝搬させることが可能となる。この光導波路構造により、プロトン交換や金属拡散等の面積を小さくして光導波路表面の損傷面積を小さくすることが可能であり、光導波路における吸収散乱が大幅に低減される。このため、本発明では基本波および変換された波長光のうち、波長が短いものの吸収により発生していた光損傷を大幅に低減することが可能である。また、基本波および変換された波長光の一方の伝搬モードを導波路で制御し、他方を導波路群で制御することにより、光導波路内における基本波と変換された波長光との電界分布のオーバーラップを高め、波長変換の高効率化が可能となる。さらに、変換された波長光の伝搬状態を適切に選択することにより、導波モードのアスペクト比を制御して、集光特性に優れた出射光を実現することが可能である。

【0101】光導波路群が、伝搬方向が異なる複数の光導波路から構成されている場合、導波路群の伝搬定数に分布を持たせることができ、波長変換素子の許容度を拡大することができる。また、テーパ導波路(形状が伝搬方向に対してテーパ状に狭くなったり、広くなったりしている導波路)を作製することができる。

【0102】変換された光の波長が基本波に対して短い(例えば高調波や和周波)場合、上記光導波路を、基本波に対してカットオフ条件を満たすように幅を設定すれば、複数の光導波路からなる光導波路群を1本の導波路としてシングルモードで伝搬させることが可能である。カットオフ条件は導波路幅と厚みで設定されるが、ここでは導波路幅で設定している。このとき、基本波から変換された波長光に対しては、光導波路が導波条件を満たすようにすることが可能である。よって、高調波が放射モードで導波する従来の光波長変換素子に比べて変換された波長光の伝搬モードを容易に制御可能で、基本波と変換された波長光の位相整合の制御が容易である。なお、基本波に対して変換された光の波長が長い(例えばパラメトリックや差周波)場合、基本波はいずれかの光導波路を伝搬し、変換された波長光は光導波路群をシングルモード伝搬する。この場合、基本波の伝搬モードを容易に制御可能であり、基本波と変換された波長光の位相整合の制御が容易である。

【0103】また、変換された光の波長が基本波に対して短い(例えば高調波や和周波)場合、特に、光導波路のうちの少なくとも1本の伝搬定数を、他の光導波路と異なる伝搬定数に設定することにより、その光導波路を基本波から変換された波長光が選択的に導波するため、変換効率の向上や出力光の安定化を図ることが可能となる。ここで、伝搬定数も導波路幅で設定する。なお、基本波に対して変換された光の波長が長い(例えばパラメトリックや差周波)場合、光導波路を基本波が選択的に

導波し、変換効率の向上や出力光の安定化を図ることが可能となる。これに対して、通常の導波路では、基本波に対して変換された光の波長が長い（例えばパラメトリックや差周波）場合、変換光の導波条件に合わせて導波路を設計すると、基本波に対してマルチモード導波路となり、変換効率が大幅に低下する。

【0104】光導波路群が左右非対称である場合、出射光のビーム形状が非対称となって集光特性が劣化するため、中央の光導波路を中心として中心対称の構造を有するのが好ましい。また、光導波路が奇数本である場合、基本波および変換された波長光ともに中央の光導波路にパワー密度の中心が集中し、基本波と変換された波長光との間でオーバーラップが高くなるので、高い変換効率を得られるので好ましい。例えば、変換された光の波長が基本波に対して短い（例えば高調波や和周波）場合、光導波路群が、伝搬方向がほぼ等しい3本の光導波路から構成され、中央の光導波路が両側の光導波路とは異なる伝搬定数を有し、光導波路群をシングルモード伝搬する基本波と、光導波路群の中央の光導波路を伝搬する変換された波長光との間で位相整合する構成とすることができる。また、基本波に対して変換された光の波長が長い（例えばパラメトリックや差周波）場合、光導波路群をシングルモード伝搬する変換された波長光と、光導波路群の中央の光導波路を伝搬する基本波との間で位相整合する構成とすることができる。なお、光導波路の本数が多いと、導波路群のサイズが大きくなり、パワー密度が低下して変換効率が低下することが考えられる。よって、対称構造の中でも最も本数が少ない3本の光導波路で光導波路群を構成するのが好ましい。

【0105】さらに、光導波路の入射部近傍および出射部近傍の少なくともいずれか一方において、光導波路群を構成する光導波路の本数を異ならせることにより、ビーム形状の整形や結合効率の向上を図ることが可能である。

【0106】ところで、従来から、 $\text{LiNbO}_3$ 基板や $\text{LiTaO}_3$ 基板にプロトン交換層を形成した場合、プロトン交換層内では耐光損傷強度が向上すると報告されていた。しかしながら、本願発明者らの検討によれば、プロトン交換した $\text{LiNbO}_3$ の耐光損傷強度は十分ではなく、例えば $\text{LiNbO}_3$ 基板に対しては一桁程度強い耐光損傷強度を示すが、 $\text{Mg}$ ドーピングした $\text{LiNbO}_3$ に比べると耐光損傷強度は数分の1に減少することが明らかになった。この原因は、ドーピング材料によって強化された耐光損傷強度がプロトン交換により低減されているためと考えられる。そこで、第2の本発明にあっては、耐光損傷強度とプロトン交換層内における $\text{Li}$ 濃度の関係に着目し、後述する第9の実施形態に示すように、 $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 基板の表面にプロトン交換により形成した光導波路において、 $\text{Li}$ のmol濃度比を40mol%以上に設定する。または、

少なくとも表面近傍に $\text{Mg}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Sc}$ 、 $\text{In}$ 等の金属元素を添加した $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) 基板の表面にプロトン交換により形成した光導波路において、 $\text{Li}$ のmol濃度比 $Y$ と金属元素のmol濃度 $Z$ を $Y+Z \geq 45 \text{ mol\%}$ の関係を満たすように設定する。これにより、プロトン交換層の結晶欠陥を低減して、光導波路の耐光損傷強度を向上することが可能である。

【0107】本発明のコヒーレント光発生装置は、耐光損傷強度に優れた本発明の光波長変換素子を用いることにより、高出力でかつ安定した出力特性を実現することが可能である。

【0108】さらに、本発明の光学システムは、出力変動が小さく、高出力の本発明のコヒーレント光発生装置を用いることにより、ノイズを低減することが可能である。

【0109】

【発明の実施の形態】本発明は、非線形光学効果による第2高調波発生を利用した光波長変換素子において、基本モードの基本波と高次モードの第2高調波（SHG）との位相整合を利用することでオーバーラップを大きくし、SHGへの波長変換効率を高めようとする構成において、耐光損傷性を飛躍的に向上させる構成を新たに提案するものである。具体的には、イオン交換により形成した第1のイオン交換領域をアニール処理により拡大し、更に第1のイオン交換領域の表面近傍に第2のイオン交換領域を形成した構成において、これに特別なアニール処理を加えることで光導波路の伝搬損失を大幅に減少し、更に耐光損傷特性の向上が可能になる点を、本願発明者らが見出した。以下に、その原理について説明する。

【0110】なお、上記の趣旨で本発明に関して行われるイオン交換処理として、例えば、プロトン交換処理を実施することができる。その場合、形成される第1及び第2のイオン交換領域とは、それぞれ第1及び第2のプロトン交換領域ということになる。本願明細書における本発明の説明では、具体的なイオン交換処理としてプロトン交換処理を説明し、これによってプロトン交換領域が形成される場合を特に説明する。しかし、本発明はこれに限られるものではなく、その他の同様のイオン交換処理によってプロトン交換領域以外のイオン交換領域を形成しても、本願明細書の中で説明するものと同様の効果を得ることができる。

【0111】まず、従来より報告されていたプロトン交換を利用した光導波路を用いて光波長変換素子の動作特性の向上を図った例と、従来の構造において新たに見つかった課題について、説明する。

【0112】従来の光波長変換素子300について、図1を用いて説明する。

【0113】図1において、X板の $\text{LiNbO}_3$ 基板301の表面近傍に、ストライプ状の光導波路305が形

成されており、光導波路305の表面近傍には、高屈折率層310が形成されている。LiNbO<sub>3</sub>基板301には、位相整合のために周期状の分極反転構造304が形成されている。光導波路305に入射した基本波306は、第2高調波307に変換されて光導波路305より出射される。

【0114】図2(a)は、基板1の上に光導波路2が形成され、更に光導波路2の表面近傍に高屈折率層4が形成されている、従来の光導波路素子300の構成を模式的に示す図であり、図2(b)及び(c)はそれぞれ、(a)の構成における深さ方向の屈折率分布、並びに(a)の構成の中を伝搬する基本波及び高調波の深さ方向の電界分布である。具体的には、波長850nmの基本波がTE00モードで入射され、光導波路2の中でTE10モードの高調波と擬似的に位相整合する。

【0115】光導波路2は、プロトン交換領域にアニール処理を施して形成した光導波路であり、このアニール処理により、プロトン交換領域の形状はステップ形状からグレーティッド形状に変化して、プロトン濃度も低下する。一方、高屈折率層4は、プロトン交換により形成した高屈折率層であるが、アニール処理は行っていないので、そのプロトンの分布形状はステップ状である。

【0116】この光波長変換素子300においては、高屈折率層4により基本波の閉じ込めが強化され、更に基本モードの基本波と高次モードの高調波との間でオーバラップの増大が図れるため、高い波長変換効率が達成できる。

【0117】しかし、この従来の光波長変換素子300の出力特性について種々の検討を行った結果、以下に示す課題の存在が明らかになった。

【0118】第1に、位相整合波長が時間とともに変化する現象が見つかった。これにより、第2高調波の出力が不安定になるという位相整合波長変動の問題が生じる。

【0119】第2に、高温試験において光波長変換素子の特性が劣化するという素子寿命の問題がある。

【0120】第3に、光導波路の伝搬損失が大きい。

【0121】それぞれの課題について、以下に詳しく説明する。

【0122】第1の課題に関しては、発生する第2高調波の高出力化によって、位相整合状態がわずかに変化していることが観測された。その原因は後述するが、高屈折率層4と光導波路2との境界において発生する光損傷が関係している。

【0123】従来から知られている光損傷とは、位相整合状態が光導波路全体に渡って崩れることで第2高調波の出力が低下する現象であるが、今回見出されたのは、位相整合カーブを維持したままで位相整合波長がシフトする現象である。波長変換効率は低下しないが位相整合波長が変化するため、基本波の波長を固定すると第2高

調波出力は徐々に減少する。このため、位相整合波長を常に最適値に合わせないと、安定した出力が得られない。位相整合波長が変化すると、光波長変換素子の位相整合波長許容度が0.1nm以下と非常に狭いために、第2高調波の出力は不安定になる。

【0124】第2の課題は、光波長変換素子の寿命試験中に発見された。具体的には、温度80℃で数10時間に渡る高温試験を行うと、光波長変換素子の位相整合波長が大きく変化したり、波長変換効率が劣化するという現象が観測された。この原因について検討した結果、高屈折率層4が高温試験で変化していることが明らかになった。高屈折率層4はアニール処理を行わないプロトン層であり、高いプロトン濃度を有し且つステップ形状のプロトン濃度分布を有している。このため、プロトン濃度が高く且つ周辺部との濃度差が大きいため、熱拡散定数が大きい。また、高屈折率層4のプロトン交換領域の熱拡散が光導波路2の特性に与える影響が非常に大きいため、高温試験に際した高屈折率層4のプロトン交換領域の変化により、光波長変換素子の特性が劣化することが明らかになった。

【0125】第3の課題は、主に第1のプロトン交換領域の問題である。表面に高屈折率層4を形成した光導波路構造では、光の閉じ込めが強化されるため、光導波路2の伝搬損失が高まる傾向にある。更に、光導波路2の伝搬損失は、電界分布の存在が最も大きな第1のプロトン交換領域の特性に影響する。本願発明者らによる検討の結果、第1のプロトン交換領域のプロトン濃度と光導波路の伝搬損失との間に密接な関係が存在することが明らかになった。

【0126】以下では、以上のような検討結果を考慮して達成された本発明の具体的な幾つかの実施形態を、添付の図面を参照しながら説明する。

【0127】(第1の実施形態)本実施形態においては、先述のような検討結果を考慮して、従来のプロトン交換を利用した光導波路における問題を解決するために、新しい光導波路構造を提案する。

【0128】上記のように、本願発明者らは、高屈折率クラッド層を有する光導波路を用いた光波長変換素子における課題について検討を行った結果、光導波路上に形成した高屈折率層と光導波路との境界において、問題が発生していることを発見した。特に、この境界部において、ステップ形状に屈折率が変化している点が、問題の原因であることを見出した。

【0129】そこで、高屈折率層を形成しているプロトン交換領域の形状について種々検討を行った結果、プロトン交換処理とアニール処理とにより第1及び第2のプロトン交換領域を形成する場合に、特殊なプロトン交換領域の屈折率分布形状において、光導波路の特性が大幅に向上することを見出した。

【0130】図3(a)は、本実施形態によるプロトン

交換導波路（光導波路）の構成を示す断面図であり、基板 1 にプロトン交換及びアニール処理により形成した第 1 のプロトン交換領域（光導波路として機能する部分）5 と、第 1 のプロトン交換領域 5 の表面近傍に形成した第 2 のプロトン交換領域（高屈折率層として機能する部分）6 と、を含む。図 3（b）は、図 3（a）の構成における深さ方向の屈折率分布を表している。図 2（b）と比較すれば明らかなように、本実施形態の光導波路では、従来の光導波路とは異なって、第 2 のプロトン交換領域 6 の屈折率分布が、アニール処理により、ステップライクなグレーディッド形状を有している。

【0131】従来、高屈折率層（高屈折率クラッド層）として機能する第 2 のプロトン交換領域としては、アニールしないプロトン交換領域、或いは高屈折率の誘電体膜など、ステップ状に屈折率分布を有する膜を用いていた。しかし、本願発明者らによる検討によって、高屈折率層である第 2 のプロトン交換領域の屈折率分布をステップ状からステップライクなグレーディッド状に変化させることで、光導波路の耐光損傷強度が大幅に増大することが見出された。

【0132】その理由について説明する。

【0133】高効率の光波長変換素子を実現するには、第 1 のプロトン交換領域 5 を導波層とし、第 2 のプロトン交換領域 6 を高屈折率クラッド層として用いて、高屈折率クラッド層を利用した基本波と高調波とのオーバーラップの増大を図る。高屈折率クラッド層として効率良く作用するためには、導波層より高い屈折率を有し、且つステップ形状の屈折率分布を有する層が必要となる。ところが、高屈折率クラッド層を有する構造において、光損傷による位相整合波長シフトが発生することが明らかになった。我々はこの問題について種々の検討を行い、その原因を解明した。すなわち、高屈折率層と導波層との境界でステップ状に屈折率に変化しているため、先に図 2（c）に示したように、高調波のパワー密度の急激な変化を生じている。光損傷は、光励起により不純物順

位が励起され内部電界を生じることで、電気光学効果による屈折率変化を生じる現象である。光の強度分布差に依存して内部電界の強度差が増大し光損傷が生じるので、高屈折率層と導波層との境界部で急激に高調波パワー密度が変化すると、その部分で屈折率変化が大きくなり、光損傷の影響が増大する。更に、物性、屈折率、光のパワー密度の変化が同時に境界部で発生することも、光損傷の影響をより大きくする要因となっている。

【0134】この状態を緩和するには、屈折率分布の変化率を低減し、境界の存在する部分を拡大することが有効であると考えた。そこで、第 1 のプロトン交換領域 5 と第 2 のプロトン交換領域 6 との境界部分を拡大したところ、光損傷の発生を大幅に緩和できる構造が存在することが見出された。すなわち、第 2 のプロトン交換領域 6 の屈折率分布をステップ状からステップライクなグレーディッド状にすることで、第 1 及び第 2 のプロトン交換領域 5 及び 6 の間の境界部の面積を増大し、光損傷の発生を大幅に低減できる。但し、プロトン交換領域 5 及び 6 の間の境界部分を拡大しすぎると、光波長変換素子の波長変換効率が大幅に減少する。すなわち、高効率の波長変換効率と高い耐光損傷強度とを同時に実現するには、第 2 のプロトン交換領域 6 の屈折率分布を適切に制御する必要がある。

【0135】次に、ステップライクなグレーディッド形状について説明する。

【0136】プロトン交換領域の屈折率分布は、プロトンの拡散分布に依存する。一般に、プロトン交換領域におけるプロトンの拡散分布は、プロトン交換処理の終了時にはステップ形状を有しているが、その後アニール処理を行うとグレーディッドな分布に変化する。ここで、プロトンの濃度分布とアニール時間との関係は、以下の式（1）で表される。

【0137】

【数 13】

$$C(k,t)=C_0 \times 0.5 \times \left\{ \text{Erf}[(h+k)/2/\sqrt{D_p \times t}] + \text{Erf}[(h-k)/2/\sqrt{D_p \times t}] \right\} \quad (1)$$

【0138】但し、上記の式（1）において、 $C(k, t)$ ：プロトン交換濃度、 $k$ ：深さ（ $\mu\text{m}$ ）、 $t$ ：アニール時間（時間）、 $C_0$ ：初期のプロトン交換濃度、 $\text{Erf}[\ ]$ ：エラー関数、及び、 $h$ ：初期のプロトン交換深さ（ $\mu\text{m}$ ）である。また、 $D_p$ は、アニールによるプロトンの拡散定数（ $\mu\text{m}^2/\text{時間}$ ）であり、その温度依存性を図 4 に示す。

【0139】本願明細書におけるステップライクなグレーディッド形状を有する屈折率分布とは、ステップ状のプロトン濃度分布によって得られるステップ状の屈折率分布と、グレーディッド状のプロトン濃度分布によって得られるグレーディッド状の屈折率分布との中間の状態

であって、表面のプロトン交換濃度の値が初期値  $C_0$  と同程度である範囲、すなわち、 $C(0, t)$  がほぼ  $C_0$  の値をとる範囲で実現される。この条件は、実際には、式（1）に含まれる  $h/2/\sqrt{D_p \times t}$  の値で規定できる。具体的には、以下の（2）の不等式の関係を満たす範囲で、ステップライクなグレーディッド形状を有する屈折率分布が実現される。

【0140】

【数 14】

$$1.5 < (h+k)/2/\sqrt{D_p \times t} < 20 \quad (2)$$

【0141】例えば、初期のプロトン交換深さ  $h=0$ 、

18  $\mu\text{m}$ である場合、ステップライクなグレーディッド形状を有する屈折率分布を実現する(2)の範囲は、アニール温度が140℃であればアニール時間で約2時間～約50時間の範囲であり、アニール温度が180℃であればアニール時間で約10分～約5時間の範囲である。

【0142】先述のように、プロトン交換領域のプロトン濃度分布は、一般にプロトン交換後のアニール処理前ではステップ形状であり、これをアニール処理すると、プロトンが熱拡散し、ステップ状からガウス分布に近いグレーディッド形状となる。プロトン交換領域の屈折率はプロトン濃度に比例するので、アニール処理によるプロトン濃度分布形状の変化に伴って、その屈折率分布形状も、ステップ形状からグレーディッド形状に変化する。

【0143】図5(a)～(c)に、アニール処理によるプロトン濃度分布の変化に伴った、屈折率分布形状の変化の様子を示す。

【0144】図示されるように、アニール処理によって、プロトン交換領域の屈折率分布形状は、ステップ形状(a)からステップライクなグレーディッド形状(b)、更に、ガウス分布に近いグレーディッド形状(c)へ変化する。このうちのステップライクなグレーディッド形状は、ステップ形状とグレーディッド形状の中間の形であり、表面のプロトン交換濃度が低下しない範囲においては、プロトンの拡散分布形状はステップライクな形状をほぼ保っている。

【0145】屈折率分布の変化は、より厳密には、アニール前のプロトン交換深さ、アニール処理温度、及びアニール処理時間に依存する。アニール処理による屈折率分布の変化を、図6に示す。図6において、屈折率分布の広がり、屈折率変化量が最大値の $1/e^2$ になる部分の幅で規定する。アニールによるプロトン交換領域の広がり、屈折率分布は、ステップライクな形状からガウス分布に近い形状に変化する。ステップライクな屈折率分布を得るには、プロトン交換領域の深さのアニール処理による広がりを約1.1倍～約2倍の間に保つ必要がある。

【0146】また、図6より、プロトン交換直後の表面屈折率は、ステップライクな屈折率形状を有している間は維持されることがわかる。しかし、屈折率分布がガウス分布に近くなり、屈折率分布の幅が2倍近くなると、表面屈折率が徐々に低下し始める。ステップライクな屈折率分布が維持されるプロトン交換領域の表面屈折率の値は、アニール処理前の値の約90%以上であった。

【0147】以上の点より、第2のプロトン交換領域のアニール処理を長い時間に渡って行くと光波長変換素子の波長変換効率が低下する現象は、第2のプロトン交換領域の表面屈折率の低下に起因していることが明らかになった。すなわち、第2のプロトン交換領域の表面屈折

率の低下により、導波光の閉じ込めが弱まって、波長変換効率の低下を招く。従って、第2のプロトン交換領域のアニール処理は、表面屈折率の低下を招かない程度に行うのが望ましい。また、光波長変換素子の高効率化には高い表面屈折率が必要であり、高屈折率クラッド層を有する光導波路における第2のプロトン交換領域6には、ステップライクな屈折率分布が要求されるため、第2のプロトン交換領域6の広がりを2倍以下に抑えることが好ましい。

【0148】本願発明者らによる実験結果より、高い波長変換効率と良好な耐光損傷強度とを両立させて実現するには、第2のプロトン交換領域6の屈折率分布が、ステップ形状とガウス分布に近い完全なグレーディッド形状との間の中間的な屈折率分布(図5(b)参照)をとる必要があることが分かった。これを、本願明細書ではステップライクなグレーディッド形状と称する。一方、第1のプロトン交換領域5は、伝搬損失の小さい導波層であり、且つ高屈折率クラッド層によるオーバーラップの向上を実現するために、完全なグレーディッド形状(エラー関数形状)をとる必要がある。

【0149】すなわち、第1のプロトン交換領域5と第2のプロトン交換領域6とが、異なる形状のグレーディッドな屈折率分布(すなわち異なる形状のグレーディッドなプロトン濃度分布)を有することが、高効率で且つ耐光損傷性に優れた光波長変換素子を実現するために、必要な条件であることが明らかになった。

【0150】プロトン交換領域の屈折率分布(プロトン濃度分布)は、アニール処理により、容易にガウス分布に近いグレーディッド形状に変化する。第2のプロトン交換領域6の屈折率分布をステップライクなグレーディッド形状に制御するには、第2のプロトン交換領域6に対するアニール処理条件を精確に制御する必要がある。本発明によれば、グレーディッド形状に変化する前のステップライクなグレーディッド形状に精確に制御することで、光波長変換素子の特性向上を実現できることが明らかになった。

【0151】図7に第1と第2のプロトン交換領域におけるプロトン交換率の分布を示す。 $\text{LiNbO}_3$ 結晶はプロトン交換により $\text{Li}_{(1-x)}\text{H}_x\text{NbO}_3$ となる。ここで示すプロトン交換率 $X$ は結晶内の $\text{Li}$ と $\text{H}$ の交換率を表し、結晶中の $\text{Li}$ と $\text{H}$ のモル数に対し、 $X = \text{H} / (\text{Li} + \text{H})$ で表される。プロトン交換されていない結晶において、プロトン交換率 $X$ は0であり、 $\text{Li}$ と $\text{H}$ が完全に交換されるとプロトン交換率 $X$ の値は約1となる。実際のプロトン交換層において、アニール処理しないプロトン交換直後のプロトン交換率は、プロトン交換温度、プロトン交換に使用する酸、およびプロトン交換時間により微妙に変化する。代表的には、プロトン交換に使われる代表的な酸である安息香酸の場合で $X = 0.67 \pm 0.02$ 、高屈折率のプロトン交換層の形成が可能なビ



口磷酸でプロトン交換した場合で $X=0.76 \pm 0.02$ 程度である。結晶中の $\text{Li}$ の70%程度がプロトンと交換されている。高屈折率なプロトン交換層を形成可能なため、プロトン交換はピロ磷酸で行うのが望ましい。

【0152】図7(a)に示したのは第1と第2のプロトン交換層からなる導波路におけるプロトン交換率の分布であり、ピロ磷酸を用いて作製した。第2のプロトン交換層におけるプロトン交換率は表面近傍で約0.76である。一方、第1のプロトン交換層におけるプロトン交換率は表面近傍で約0.1程度である。プロトン交換率に大きな差を付けることで、第2のプロトン交換層と第1のプロトン交換層との屈折率差を十分とっている。また図からわかるように、第2のプロトン交換層を形成するには、プロトンの拡散を最小限に押さえる条件でアニール処理を施さねば成らない。プロトン濃度分布が崩れない程度に、かつ第1のプロトン交換層に影響を与えない程度に温度および時間の制御を行う必要がある。そのために、第2のプロトン交換を形成する温度を200℃以下とし、拡散分布を崩さない程度に時間制御を行いながら形成した。

【0153】第1と第2のプロトン交換率の分布を拡大したのが、図7(b)、(c)に示すプロトン交換率の分布図でそれぞれ第1および第2のプロトン交換層の分布を表している。図に示すように、全く異なった形状をとっている。第1のプロトン交換層におけるプロトン交換率の分布は、アニール処理により完全にグレーディッド形状に成っている。これに対し、第2のプロトン交換層はステップライクなグレーディッド形状になっている。また、第1と第2のプロトン交換層の大きな違いは、プロトン交換率の深さ方向の変化量である。第1のプロトン交換層においては、表面におけるプロトン濃度が低減すると共に、プロトン交換率 $X$ の深さ方向の変化量が非常に小さくなっている。一方、第2のプロトン交換層においては、プロトン交換率が深さ方向に急激に変化する。深さ方向のプロトン交換率 $X$ の変化量( $\mu\text{m}^{-1}$ )を以下のように規定する。プロトン交換率の変化量 $=|\Delta X / \Delta \text{深さ}|$ とプロトン交換のアニール状態をプロトン交換率の変化の絶対値で表すことができる。まず第1のプロトン交換層におけるプロトン交換率の変化量は約 $0.04 \mu\text{m}^{-1}$ 程度である。プロトン交換層のプロトン濃度を下げて、非線形光学定数を十分回復させるには、プロトン交換率の変化量は少なくとも $0.1 \mu\text{m}^{-1}$ 以下が必要であり、高効率化を達成するには $0.06 \mu\text{m}^{-1}$ 以下が望まれる。

【0154】一方、第2のプロトン交換層においては、プロトン濃度が深さ方向に変化する領域の大きさが重要に成ってくる。前述したように、第1と第2のプロトン交換層との境界部分がこのプロトン濃度に変化している領域であり、この領域をアニール処理により形成することで耐光損傷性に優れた光導波路の形成が可能となる。

具体的には、図7(c)に示したように、プロトン交換率が変化している領域は第2のプロトン交換領域において $0.05 \mu\text{m}$ 程度である。プロトン交換直後はこの領域が $0.01 \mu\text{m}$ 以下である。第2のプロトン交換領域のアニール処理によりプロトン交換率が変化している領域を $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ の間で拡大することが望ましい。さらに、高効率交換を実現するには、 $0.03 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 程度の間を押さえることが望ましい。第1のプロトン交換層との大きな違いは、この領域の大きさである。第1のプロトン交換領域においては、プロトン分布が完全なグレーディッドとなっているため、プロトン交換率の変化する領域は数 $\mu\text{m}$ に達する。これに対し、第2のプロトン交換領域はプロトンの分布がステップライクなグレーディッド形状であるため、プロトン交換率が変化する領域が $0.02 \sim 0.2 \mu\text{m}$ と大きく異なっている。さらに、第1と第2のプロトン交換領域の違いは、そのプロトン交換率の変化量である。第1のプロトン交換領域はプロトン交換率が完全なグレーディッド状態に成っているため、 $X$ の変化率は $0.04 \mu\text{m}^{-1}$ 程度である。これに対し、第2のプロトン交換領域は $15 \mu\text{m}^{-1}$ 程度と非常に大きい。高効率交換が可能なステップライクなグレーディッド形状を実現するには、プロトン交換率の変化量を $5 \sim 50 \mu\text{m}^{-1}$ 程度に設定するのが望ましい。さらに耐光損傷強度を高めるには、変化量を $10 \sim 30 \mu\text{m}^{-1}$ 程度に設定するのがより望ましい。

【0155】第1と第2のイオン交換層においては、基本波とSHGの位相関係が逆転するため(図2参照)、第2のイオン交換層における非線形光学効果の増大は交換効率の低減になる。従って、第2のイオン交換層の非線形光学定数が低いほど変換効率は高くなる。高いプロトン交換濃度で非線形定数が60%以下に低減されることが望ましい。

【0156】次に、耐光損傷強度に優れた光導波路を形成する第2のプロトン交換領域6のプロトンの濃度分布形状について、更に詳しく検討した結果を説明する。

【0157】まず、第2のプロトン交換領域6における好ましい屈折率分布を実現可能な作製条件について、検討した。

【0158】図10及び図11には、アニール処理を行ったときに発生する第2のプロトン交換領域6の拡大の様子を第2のプロトン交換領域6の深さ(プロトン交換領域の半値全幅の大きさ)の変化によって表し、これをパラメータ(横軸)にとって、光波長変換素子の波長変換効率及び表面屈折率(図10)、並びに耐光損傷強度(図11)と第2のプロトン交換層6の深さとの関係を描いている。但し、横軸は、アニール処理の開始前の第2のプロトン交換領域6の深さによって規格化された値を示している。従って、縦軸との交点における光波長変換素子の波長変換効率及び表面屈折率(図10)、並びに耐光損傷強度(図11)の値は、アニール処理の開始



前の値を示している。

【0159】図11に示されるように、耐光損傷強度は、第2のプロトン交換領域が、アニール処理により、アニール処理前の深さの1.2倍以上に拡大するあたりで急激に増大し、更にアニール処理を行うと、耐光損傷強度は徐々に増大した。これは、アニール処理の継続に伴って第2のプロトン交換領域6の屈折率分布がグレーディッドな形状に近づくに従って、第1及び第2のプロトン交換領域5及び6の間の境界部が拡大するためである。

【0160】更に、本検討中に新しい現象を発見した。すなわち、第2のプロトン交換領域6をアニール処理すると、図10に示されるように、光波長変換素子の波長変換効率が大幅に拡大することが見いだされた。

【0161】具体的には、第2のプロトン交換領域6の増大（深さの増加）とともに波長変換効率は増加し、アニール前の1.5倍程度の深さになった時点で、最大になった。この時点で、波長変換効率はアニール処理前に得られる値の2倍近い値となり、大幅な波長変換効率の向上が確認された。しかし、更にアニール処理を続けると、第2のプロトン交換領域6の深さがアニール前の値の2倍程度になるあたりで波長変換効率は減少し始め、アニール処理の継続とともに減少した。これは、図10にあわせて示すように、第2のプロトン交換領域6の表面屈折率が、このあたりで減少し始めるためである。

【0162】第2のプロトン交換領域6をアニール処理することで波長変換効率が向上する理由は、2つ考えられる。

【0163】第1に、アニール処理することで第2のプロトン交換領域6の深さが増大するが、屈折率分布がステップライクなグレーディッド形状を有して表面屈折率の低下が少ない範囲では、実効屈折率が増大する。このため、光導波路への導波光の閉じ込めが強化されて導波光のパワー密度が増大することで、波長変換効率が向上する。

【0164】第2に、第2のプロトン交換領域6の均一性の向上の影響が考えられる。すなわち、第2のプロトン交換領域6は、アニール処理を行っていない場合には、第1のプロトン交換領域5との境界近傍に結晶的な歪みを有し、これが光導波路（第1のプロトン交換領域5）の不均一性の原因となっている。光導波路（第1のプロトン交換領域5）の不均一性は、波長変換効率に与える影響が大きく、効率低下の原因となる。これに対して、第2のプロトン交換領域6にアニール処理を加えると結晶歪みが減少し、結果的に光導波路（第1のプロトン交換領域5）の均一性が増す。これによって、波長変換効率の大幅な向上が実現する。

【0165】耐光損傷強度の観点からみると、第2のプロトン交換領域6の深さは、アニール前の値の1.2倍以上であることが望ましい。更にアニール前の値の1.

5倍以上になると、耐光損傷強度がより向上するため、より好ましい。一方、波長変換効率の向上の観点からは、第2のプロトン交換領域6の深さは、アニール前の値の1.2倍～2.5倍程度が望ましい。更に、アニール前の値の1.5倍～2倍程度では、波長変換効率が2倍に増大するため、より好ましい。

【0166】更に、第2のプロトン交換領域6の屈折率分布をステップライクなグレーディッド形状にすることで、光波長変換素子の経時変化がなくなることが明らかになった。この点を以下に説明する。

【0167】先に述べたように、プロトン交換光導波路により形成した光波長変換素子は、80℃程度の高温信頼性試験により特性劣化を生じる。本願発明者らによる検討では、第2のプロトン交換領域6の深さが経時変化により増大することが、上記の特性劣化の主要原因であることが明らかになった。これは、アニールを行わないプロトン交換領域の厚さが経時変化により容易に変化すること、及び、ステップ状の屈折率分布の厚さがわずかに変化しても光波長変換素子に与える影響が大きいことに、起因している。具体的には、本願発明者らによる実験では、アニールを施さなかったサンプルでは、温度80℃で約100時間の高温信頼性試験により、位相整合波長が約0.2nm～約0.6nm変化することが分かった。これに対して、アニールを施したサンプルでは、温度80℃で約1000時間の高温信頼性試験の後でも、位相整合波長のシフトは約0.02nm以下であり、実質的な変化を示さなかった。

【0168】これに対して、本発明に従って第2のプロトン交換領域6をアニール処理してグレーディッド形状にすると、経時変化がほとんどなくなった。これは、アニール処理を加えて経時変化を加速することで、特性の経時的な変化、特に高温での屈折率分布の変化が、大幅に低減されたためである。更に、第2のプロトン交換領域6の屈折率分布がステップ状からステップライクなグレーディッド状に変化したことで、第1及び第2のプロトン交換領域5及び6の間の境界部分が一定の領域を有するようになるために、深さ方向の屈折率分布の変化が生じた場合の光波長変換素子に与える影響が、大幅に緩和できると考えられる。

【0169】具体的にプロトン交換領域の拡大と特性の経時変化との関係を調べると、アニール処理によりプロトン交換厚さが1.1倍程度に拡大するまでは、経時変化特性は変化が見られなかったが、1.3倍以上に拡大すると高温試験特性での劣化は見られなくなった。

【0170】一方、第1のプロトン交換領域5は、光導波路の伝搬損失と密接な関係を持っている。第1のプロトン交換領域5をアニール処理により拡大することで、光導波路の伝搬損失を大幅に低減できる。例えば、330℃で3時間のアニール処理を行ったところ、第1のプロトン交換領域5におけるプロトンの分布（第1のプロ

トン交換領域5の深さ)がアニール前の8倍程度に拡大した時点で、光導波路の伝搬損失は $1\text{ dB/cm}$ 以下になり、最低レベルを呈した。但し、それ以上にアニール処理を継続しても、導波損失の更なる低減は認められなかった。

【0171】これより、低損失の光導波路を形成するには、アニール処理により、第1のプロトン交換領域5の深さを8倍以上に拡大する必要がある。

【0172】次に、プロトン交換により光導波路を形成するためのプロセスについて説明する。

【0173】図8(a)～(e)を参照して、光導波路の作製方法を示す。図8(a)～(e)は、各工程を説明するための模式的な断面図であり、更に(b)～(e)に関しては、各々の工程によって得られる形状における深さ方向の屈折率分布形状も、あわせて示している。

【0174】基板1には、例えば、X板の $\text{MgO}$ ドープの $\text{LiNbO}_3$ 基板1を用いる。まず、図8(a)に示すように、例えばタンタル(Ta)を用いて、光導波路用のストライプ状のマスクパターン11を、基板1の表面に形成する。次に、図8(b)に示すように、 $200^\circ\text{C}$ のピロリン酸中で熱処理して、第1のプロトン交換領域5を、基板1のうちでマスクパターン11にカバーされていない領域に形成する。続いて、図8(c)に示すように、Taマスクパターン11の除去後に、第1のアニール処理により、第1のプロトン交換領域5を熱拡散させる。更に、図8(d)に示すように、 $200^\circ\text{C}$ のピロリン酸により、第2のプロトン交換領域6を基板1の表面に形成する。続いて、図8(e)に示すように、第2のアニール処理を行って、第2のプロトン交換領域6を熱拡散させる。

【0175】第1のプロトン交換領域5の深さ(厚さ)は、典型的には約 $0.17\mu\text{m}$ ～約 $0.25\mu\text{m}$ であり、これは、高屈折率クラッドを堆積した後に、基本波として $850\text{ nm}$ 近傍の波長をシングルモード条件で伝搬可能な条件である。

【0176】上記のような深さ(厚さ)を有する第1のプロトン交換領域5をアニール処理する第1のアニール処理の温度について、検討した。

【0177】第1のアニール処理により、光導波路として機能する第1のプロトン交換領域5は、深さ $2\mu\text{m}$ 以上に拡大する必要がある。その理由は、第1に、光導波路部における屈折率分布を完全なグレーデッド形状にし、伝搬損失を低減するためである。第2は、プロトン交換により基板1の非線形性が大きく低下しているため、これを回復するためである。高効率の光波長変換素子を実現するには、光導波路の非線形性を十分高い値にする必要があり、アニール処理によりプロトン交換の比率を $1/8$ 以下に低減することで、プロトン交換領域の非線形性を基板1に近い値まで回復できる。更に第3の

理由は、高屈折率クラッド層を有する光導波路構造を形成するためである。第1のプロトン交換領域5の表面屈折率を低下させ、第2のプロトン交換領域6との屈折率差を大きくとることで、プロトン交換による高屈折率クラッド層を実現することが可能となる。

【0178】以上の条件を満足するには、第1のプロトン交換領域5をアニール処理する温度は、 $300^\circ\text{C}$ 以上であることが好ましい。アニール温度を $300^\circ\text{C}$ 以下にすると、アニール処理を数10時間行っても必要な屈折率分布を形成できないためにプロセス効率が極端に低下する。更に、アニール処理による光導波路の伝搬損失の減少が、第1のプロトン交換領域5に対するアニール温度を $300^\circ\text{C}$ 以上にすることで、より効率良く達成できる。

【0179】また、アニール処理によるプロトン交換領域の熱拡散及び伝搬損失は、アニール処理温度に依存し、アニール処理温度が高いほど、同程度のプロトン拡散に対して低損失の光導波路が実現できる。このため、より低損失の光導波路を形成するためには、高温のアニール処理が必要となる。アニール温度と伝搬損失の関係を求めたところ、第1のプロトン交換領域5に対するアニール処理の温度を $300^\circ\text{C}$ 以上にすることで、伝搬損失を $1\text{ dB/cm}$ 以下にすることができた。

【0180】一方、第2のプロトン交換領域6の深さ(厚さ)は、波長 $850\text{ nm}$ 程度の基本波に対して約 $0.15\mu\text{m}$ ～約 $0.21\mu\text{m}$ 程度であることが好ましい。これは、基本波の光が第2のプロトン交換領域6でカットオフとなる領域である。

【0181】更に、本願発明者らによる検討により、第2のプロトン交換領域6の深さは、以下の理由により、基本波に対してカットオフとなる境界の深さ(導波条件とカットオフ条件との境界)に対して、 $90\%$ 以下の深さとするのがより好ましいことが分かった。

【0182】第2のプロトン交換領域6は、アニール処理によって、その実効屈折率が増大する。この場合、カットオフ条件の境界の近傍に第2のプロトン交換領域6の深さを設定すると、第2のプロトン交換領域6に対するアニール処理によって第2のプロトン交換領域6の実効屈折率が増大するとともに、第2のプロトン交換領域6の中を基本波が導波することが可能になる。本願発明者らによる検討によれば、上記の結果として、波長変換効率の大幅な減少が発生することが明らかになった。これを防止するためには、第2のプロトン交換領域6の深さを、カットオフ条件の境界の深さに対して $90\%$ 以下に設定して、アニール処理後においても、第2のプロトン交換領域6の深さが基本波に対してカットオフ条件を保つようにする必要がある。

【0183】この第2のプロトン交換領域6をアニール処理する第2のアニール条件としては、アニール温度を $250^\circ\text{C}$ 以下に設定する必要があることが分かった。そ

の理由は、屈折率分布の制御性、及び表面屈折率の低下度の減少の2点である。

【0184】第2のアニール処理では、第2のプロトン交換領域6の屈折率分布をステップライクなグレーディッド形状に制御する必要がある。このために、アニール処理の時間制御を精密に行う必要がある。同時に、アニール処理後の光導波路（第1のプロトン交換領域5）の均一性を得るために、光波長変換素子面内におけるアニール処理の分布に対しても、高い均一性が要求される。アニール処理によるプロトン交換領域の熱拡散速度は温度とともに増大するため、アニール処理温度が250℃以上になるとアニール処理時間が数秒程度となり、精密な温度時間制御が困難になる。また、短時間の高温処理になると、基板内の温度分布により光導波路の伝搬定数の分布が形成されて、光導波路の均一性が劣化する現象が観測された。

【0185】従って、以上の点より、第2のプロトン交換領域6に必要とされる均一な屈折率分布を精度良く形成するには、低温で長時間アニール処理をすることが好ましい。具体的な第2のプロトン交換領域6に対するアニール温度としては、150℃で5～6時間以上、180℃で数時間、200℃以上では数分になる。

【0186】例えば、第2のプロトン交換領域6を140℃でアニール処理した場合、最適なステップライクなグレーディッド形状の分布が得られる条件は、アニール時間が2時間～20時間の範囲であった。特に、3時間以上のアニール処理を行うと、耐光損傷強度の大幅な向上が観測された。一方、180℃でアニール処理した場合は、3時間以下のアニール処理で、良好な分布形状が得られた。但し、アニール温度180℃で10時間を越えるアニール処理を行った場合、第2のプロトン交換領域6が広がり過ぎて完全なグレーディッド形状となり、波長変換効率が低下するという現象も観測された。

【0187】これらのことより、第2のプロトン交換領域6に対する第2のアニール処理に関して、光導波路に必要な屈折率分布を制御良く実現するには250℃以下のアニール処理温度が必要であり、光導波路の均一性を達成するには200℃以下が好ましい。

【0188】同時に、アニール処理による第2のプロトン交換領域6の表面屈折率の低下が、アニール温度に比例して大きくなることが分かった。高効率の光波長変換素子を実現するには、第2のプロトン交換領域6の表面屈折率を、できるだけ高い値にする必要がある。具体的には、アニール前の表面屈折率とほぼ等しい値が望ましい。ところが、アニール処理温度の上昇により、第2のプロトン交換領域6を構成する結晶表面の屈折率が減少する。これは、アニール温度により、プロトン交換領域の結晶構造が変化するためと考えられる。アニール温度と表面屈折率との関係を見ると、アニール温度が約250℃を越えると、表面屈折率の減少が大きくなることが

明らかになった。

【0189】以上の結果より、第2のプロトン交換領域6のアニール温度（第2のアニール処理の温度）は、250℃以下に設定することが好ましい。

【0190】また、第2のプロトン交換領域6のアニール処理温度の下限についても検討したところ、アニール処理温度が130℃以下になると、どれだけアニール処理しても屈折率分布の変化が小さく、必要とするステップライクなグレーディッド形状を達成できないことが分かった。従って、第2のプロトン交換領域6に対する第2のアニール処理温度としては、130℃以上が好ましい。

【0191】本実施形態では、基板1としてX板の $MgO:LiNbO_3$ 基板を用いている。或いは、その他に、Z板や87度カットZ板など結晶方位の異なる基板を使用しても、同様の効果が得られる。特に、結晶表面を結晶軸から傾けた基板の使用が、有効である。結晶軸と基板表面とを傾けた基板を用いる場合、例えばX板（結晶のX軸に垂直な面で切り出した基板）に対してX軸を角度だけ傾けた基板では、より深い分極反転構造の形成が可能となり、より高効率の光波長変換素子の形成が可能になることが報告されている。

【0192】結晶軸を傾けた基板においては、プロトン交換により形成した光導波路の伝搬損失の低減が重要となる。結晶軸を傾けた基板においては、伝搬損失のアニール処理依存性が大きく、通常のX板よりも容易に伝搬損失が増大することが見出されたが、これを解決するには、第1のプロトン交換領域5のアニール処理を300℃以上で行う必要がある。更に、本実施形態で示したように、第2のプロトン交換領域6をアニール処理して、そのプロトン交換濃度の分布形状（屈折率分布の形状）を、ステップ形状からステップライクなグレーディッド形状に変化させることが非常に有効であることが分かった。

【0193】基板1として、上記で言及したMgドープの $LiTaO_3$ 基板に代えて、その他の材料（非線形光学結晶）からなる基板、例えばZn或いはInドープの $LiTaO_3$ 基板、或いは $LiNbO_3$ 基板、 $LiTaO_3$ 基板、更には、これらの混晶である $LiNb_xTa_{1-x}O_3$ 結晶（ $0 \leq x \leq 1$ ）からなる基板、また、これにMg、Zn、Inなどをドーピングした材料からなる基板も、同様に使用可能である。これらの何れの基板においてもプロトン交換が可能であり、プロトン交換領域のアニール特性も同様であるため、同じ効果が得られる。

【0194】（第2の実施形態）次に、本発明の光波長変換素子について、図9（a）及び（b）を参照して説明する。

【0195】図9（a）は、本実施形態における光波長変換素子60の斜視図であり、（b）は、そこに含まれる光導波路の断面図である。また、（b）では、深さ方

向の屈折率分布もあわせて示している。

【0196】図9(a)において、X板の $\text{LiNbO}_3$ 基板1の表面近傍にストライプ状の第1のプロトン交換領域5が形成されており、第1のプロトン交換領域5の表面近傍には、第2のプロトン交換領域6が形成されている。 $\text{LiNbO}_3$ 基板1には、位相整合のため周期状の分極反転構造7が形成されている。第1のプロトン交換領域5は、幅 $W1$ ＝約 $5\mu\text{m}$ 、深さ $D1$ ＝約 $2.5\mu\text{m}$ であり、第2のプロトン交換領域6は、深さ $D2$ ＝約 $0.22\mu\text{m}$ である。

【0197】第1のプロトン交換領域5は、 $\text{LiNbO}_3$ をプロトン交換した後にアニール処理して形成されており、 $\text{Li}_{1-x}\text{H}_x\text{O}_3$  ( $0 < x < 1$ ) として示される組成を有しており、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶内の $\text{Li}$ の一部が $\text{H}$ に交換されている。具体的には、第1のプロトン交換領域5は、まずプロトン交換領域を深さ $0.2\mu\text{m}$ 程度形成し、これを $330^\circ\text{C}$ で3時間のアニール処理により、 $2.5\mu\text{m}$ まで拡大した。

【0198】第2のプロトン交換領域6も、同様にプロトン交換により形成されている。第2のプロトン交換領域6は、プロトン交換領域を深さ約 $0.18\mu\text{m}$ に形成し、これを $180^\circ\text{C}$ で1時間アニール処理して $0.22\mu\text{m}$ に拡大し、ステップライクな屈折率分布を備えている。

【0199】このようにして得られる光波長変換素子60の構成において、導波路部分として機能する第1のプロトン交換領域5と、高屈折率クラッド層として機能する第2のプロトン交換領域6とは、図9(b)に示されるように、異なる形状のグレーディッドな屈折率分布を有している。この光波長変換素子には、波長 $850\text{nm}$ の基本波が $\text{TE}_{00}$ モードで入射され、導波路内で $\text{TE}_{10}$ モードの高調波と擬似的に位相整合する。

【0200】この光波長変換素子60において、高調波へ高効率で波長変換できる原理について説明する。

【0201】高屈折率層(第2のプロトン交換領域6)を有する光導波路においては、基本波と高調波との間でのオーバーラップが増大し、導波光の閉じ込めが強化されて、高効率の波長変換が可能となる。これは、高屈折率層により基本波の電界分布が基板1の表面に引き寄せられて、光導波路への閉じ込めが強化されるためであり、あわせて光のパワー密度も増大する。一方、発生する第2高調波に関しては、その伝搬モードとして高次の $\text{TE}_{10}$ モードを選択することで、高屈折率クラッド層による光導波路への閉じ込め強化の影響を受けない。これによって、閉じ込め強化された基本波と波長変換で得られる第2高調波との間で、オーバーラップの増大が図られる。このような基本波のパワー密度の増大と基本波-第2高調波間のオーバーラップの増大により、波長変換効率の大幅な向上が実現される。

【0202】更に、高屈折率クラッド層を形成している

第2のプロトン交換領域6を、アニール処理によりステップライクなグレーディッドな形状にすることで、耐光損傷強度を大幅に向上させることが可能になった。この結果、 $10\text{mW}$ 以上の青色光出力を、数 $100$ 時間以上の長時間に渡って安定に出力させることが可能になった。また、光波長変換素子の経時変化もなくなり、室温では数万時間、 $60^\circ\text{C}$ の環境下での数 $1000$ 時間の放置実験でも、特性の変化は観測されなかった。

【0203】以上の結果、実用化に耐える光波長変換素子の実現が可能となった。

【0204】なお、高屈折率クラッド構造の使用により高効率な動作特性(波長変換特性)を実現するためには、第2のプロトン交換領域6において、光導波路(第1のプロトン交換領域5)を伝搬する基本波がカットオフされる一方、第2高調波は導波可能となる条件を満足する必要がある。第2のプロトン交換領域6を基本波がカットオフとなることで、基本波は、導波路部(第1のプロトン交換領域5)を導波することが可能となる。また、高調波が高屈折率層(第2のプロトン交換領域6)を導波可能な条件においては、高調波の高次導波モードを、高効率の波長変換に利用できる。

【0205】一方、集光特性の観点からも、高屈折率層(第2のプロトン交換領域6)と導波路部(第1のプロトン交換領域5)との間で、屈折率が所定の関係を満たすことが要求される。

【0206】サブピークを有する導波光をレンズ系で集光する際、サブピークの大きさにより集光特性が劣化する。集光スポットをシングルスポットにし、且つ回折限界と同等或いはそれ以下の集光スポットを得るには、導波モードのサブピークを集光レンズの回折限界以下に低減する必要がある。サブピークの幅は高屈折率層(第2のプロトン交換領域6)の幅及びその屈折率で規定されるが、実際には、高屈折率層の深さとはほぼ等しくなる。従って、サブピークの幅を回折限界以下に抑えるには、高屈折率層(第2のプロトン交換領域6)の深さ $D2$ を、高調波の回折限界以下に抑える必要がある。これより、第2のプロトン交換領域6の深さ $D2$ のアニール処理による拡大は、少なくとも、アニール前の値の2倍以下に抑えなければならない。

【0207】第2のプロトン交換領域6の深さ $D2$ が $0.5\mu\text{m}$ 程度の時は、かなり集光特性が改善され、 $D2 < 0.4\mu\text{m}$ のときは、回折限界以下の集光特性が得られた。集光レンズの開口数 $\text{NA} = 1$ で且つ波長 $425\text{nm}$ と仮定して回折限界を計算すると、その値は約 $0.34\mu\text{m}$ となり、第2のプロトン交換領域6の深さ $D2$ が回折限界より小さければ、集光特性に優れた出射ビームが得られる。

【0208】なお、本実施形態では、基板1としてX板の基板を用いたが、他にY板、Z板、また結晶軸が表面から傾いた基板でも良い。例えば、Z板、或いは結晶軸

が基板表面から傾いた基板の使用は、深い分極反転構造の形成が容易であり、高効率化が図れるために、有望である。

【0209】また、本実施形態ではTEモードの偏光方向を利用したが、その理由は、通常の半導体レーザから出射される光の偏光方向と導波路の偏光方向とを、一致させるためである。半導体レーザと同じ偏光方向を有する光導波路にすることで、導波路同士を低損失で結合させることが可能となる。但し、TMモード偏光の光導波路も利用可能であり、TMモードの光導波路では、偏光方向を $\lambda/2$ 板により制御することで、結合損失を低減することが可能である。

【0210】更に本実施形態では、光導波路を用いた光波長変換素子について説明したが、本発明の光導波路は、他の光導波路素子にも有効である。高屈折率層（第2のプロトン交換領域6）を光導波路（第1のプロトン交換領域5）の上に形成することにより、光導波路を伝搬する導波光の電界分布が表面近傍に強く引き寄せられるので、光導波路上に形成するプレーナ電極やグレーティング素子の影響を導波光に強く与えることが可能となり、効率の高い変調及び回折効果が得られる。

【0211】（第3の実施形態）ここでは、他の光波長変換素子の構成について述べる。

【0212】本発明の光波長変換素子では、X板の $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板の上に、周期状分極反転と光導波路とが形成されている。 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板は、結晶のZ軸が基板の表面に対して3度傾くように基板を切り出している。このように結晶軸の傾いた基板を用いると、深い分極反転構造が形成できるため、高効率の光波長変換素子が構成できる。これは、分極反転が結晶のZ軸に沿って形成されるため、基板表面から基板内部に形成されるためである。

【0213】そこで、この性質を利用して光波長変換素子を形成した。得られる光波長変換素子では、分極反転領域は基板内部に形成されており、表面の第1のプロトン交換領域と第2のプロトン交換領域との境界近傍部分から基板内部に向けて周期状の分極反転構造を持ち、第2のプロトン交換領域の内部には分極反転構造を持たないように形成されている。これによって、光波長変換素子における波長変換動作の高効率化を図れる。

【0214】光波長変換素子の波長変換効率は、分極反転構造と光導波路とを伝搬する導波光（基本波及び高調波）とのオーバーラップに依存する。ところが、一般に高効率化のために、高調波として高次の導波モード（TE10モード）を用いるため、高調波の電界分布は、高屈折率層（第2のプロトン交換領域6）と導波路部（第1のプロトン交換領域5）との境界で、高調波の電界強度における位相が逆転している。このため、高調波の電界強度が、高屈折率クラッド層を形成する第2のプロトン交換領域6と導波路部を構成する第1のプロトン交換領

域5との境界で、0になる。このように両者の境界部分で高調波の強度が急激に変化すると、高調波のパワー分布が形成されて、光損傷発生の原因となる。これを防止するためには、第2のプロトン交換領域6をアニール処理してグレーディッドな形状にすることで、境界の分布を拡大することが有効であった。

【0215】一方、周期状の分極反転構造内に形成した光導波路（第1のプロトン交換領域5）は、分極反転構造を有さない基板上に形成した光導波路に比べ伝搬損失が高い。これは、電界印加により周期状の分極反転を形成した際に内部電界が発生し、これによって分極反転部分に屈折率変化を生じていることが原因と考えられる。そのため、光導波路が分極反転による周期的な屈折率変化の影響を受けて、導波損失を増大させていた。

【0216】そこで、分極反転構造における伝搬損失を低減するため、分極反転構造7に内在する内部電界を除去して、屈折率変化を低減する検討を行った。

【0217】内部電界は、不純物順位に電荷がトラップされた場合に発生する。そこで、熱処理を行うことで、内部電界を形成している不純物順位を励起して電荷を放出させ、これによって内部電界を低減することを試みた。具体的には、光導波路（第1のプロトン交換領域5）を形成する前に、分極反転構造7を熱処理する検討を行った。その結果、高い温度で熱処理することで、内部電界を低減できることを見出した。

【0218】熱処理温度を変えて熱処理を行って光導波路の伝搬損失の変化を観測したところ、熱処理温度が350℃以下では伝搬損失の変化はほとんどなく、伝搬損失の低減を図るには、400℃以上の熱処理が必要なが分かった。熱処理温度が400℃を越えると、熱処理時間に比例して伝搬損失は低減した。更に、屈折率変化を完全に除去するには、500℃以上の熱処理が好ましい。但し、 $\text{LiNbO}_3$ 基板、或いは $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 基板の場合、熱処理温度が800℃を越えると、分極反転構造が縮小して分極反転の厚さが減少するため、光波長変換素子の特性が劣化することが分かった。

【0219】以上の点より、上記の目的で行う分極反転構造に対するアニール処理温度としては400℃～800℃が好ましく、光導波路の伝搬損失を更に低減するには500℃～800℃がより好ましいことが分かった。

【0220】更に、高屈折率クラッド層を有する構造では基本波の閉じ込めが強化されているため、屈折率変化による導波損失の発生が大きくなる。特に、高屈折率層の部分（第2のプロトン交換領域6）での基本波-高調波のオーバーラップは、高調波への波長変換を低下させる。これを防止するには、基本波-高調波の高屈折率層でのオーバーラップが、波長変換に影響を与えないようにする必要がある。

【0221】そこで、第2のプロトン交換領域6における周期状の分極反転構造を無くすことで、選択的に、高

屈折率層における位相整合条件が成立しないようにすることができる。これによって、光波長変換素子の高効率化が実現される。

【0222】本実施形態では結晶軸が3度傾いた結晶を用いたが、結晶軸の傾きが10度以下の結晶であれば、深い分極反転構造が形成できるために使用できる。特に、結晶軸の傾きが3度～0.5度の結晶は、分極反転の傾きが小さく、使用面積が増大するために有望である。

【0223】(第4の実施形態)本実施形態では、本発明の光波長変換素子を用いて構成される短波長光発生装置(短波長光源)について、添付の図を参照して説明する。

【0224】図12に、本実施形態の短波長光発生装置400の構成を示す。

【0225】この短波長光発生装置400は、半導体レーザ421及び光波長変換素子422を含み、半導体レーザ421の発光領域423より出射された基本波P1は、光波長変換素子422に形成されている光導波路(第1のプロトン交換領域)402に入射する。光導波路402の表面には、第2のプロトン交換領域403が形成されている。また、それぞれの部品は、Siマウント420に固定されている。

【0226】光波長変換素子422に入射した基本波P1は、その導波路402の中をTE00モードで伝搬し、高調波の高次モードであるTE10モードに変換されている。この高調波P2は、光波長変換素子422より放射され、短波長レーザビームとして使用される。

【0227】ここで注目するのは、光波長変換素子422の光導波路402の中を伝搬する高調波P2のTE10モードのモードプロファイルである。TE10モードは高次の導波モードであるため、強度分布として2つのピークを有する。ここで、2つのピークの中で大きい方をメインピーク、小さい方をサブピークと呼ぶことにする。

【0228】一般に、サブピークを有するTE10モードは、集光光学系で集光される、導波モードと同様のサブピークを有する集光スポットとなり、回折限界近傍の単一ピークの集光光として使用する場合に問題となる。そこで、本願発明者らは、高調波P2を集光する際に問題となるサブピークをほぼ無くす方法を、新たに見出した。これによれば、導波モードの状態におけるサブピークの幅を、集光に用いる集光光学系の回折限界に対して十分に小さな値にする。具体的には、集光光学系の分解能以下の幅にサブピークを抑えることにより、集光スポットにサブピークが与える影響を無くすることができる。

【0229】実験では、開口数NA=0.95の集光レンズを用いて、波長425nmの高調波を集光した。このときの空気中での光の回折限界は、約0.34μmで

ある。サブピークの幅として0.32μm以下になるように光波長変換素子422の光導波路402を設計したところ、得られた集光スポットにおいて、サブピークは全く観測されなかった。すなわち、サブピークを有する高次の導波モードは、サブピークの幅が空気中での光の回折限界(0.8λ/NA)程度以下であれば、集光時に集光スポットに与える影響はなく、有効に利用されることが分かった。このため、ビーム整形により低下する出力の利用効率を80%以上に向上させることが可能となり、有効であった。

【0230】更に、回折限界以下の幅を有するサブピークを有する導波光を利用すると、レンズの回折限界以下にビームを集光できる超解像効果が得られることが分かった。TE00モードの光を集光すると、集光ビームの幅として、レンズの回折限界(0.8λ/NA)に近い値が得られた。一方、サブピークを有する高次のTE10モードの光を集光すると、サブピークを有する側のビーム形状が切り立った形になり、集光スポットの幅として回折限界の90%程度まで集光が可能となって、超解像効果を有することが分かった。実験によると、サブピークの幅を、波長λの光の空気中での回折限界(=約0.8λ)以下にすることで、集光スポットの幅が、使用するレンズ(開口数:NA)の回折限界(0.8λ/NA)より小さくなっていることが明らかになった。このように、回折限界以下の幅を有するサブピークを持つ導波モードを集光することで、より小さな集光スポットが得られる。

【0231】更に、サブピークの幅と集光スポットとの関係について詳しく調べたところ、

(1) サブピークの幅:  $< 0.8 \times \lambda$

回折限界以下の集光特性(超解像効果)が得られる

(2) サブピークの幅:  $0.8 \times \lambda \times (1 + 0.2(1/NA - 1)) \sim 0.8 \times \lambda \times (1 + 0.5(1/NA - 1))$

回折限界とほぼ同等の集光スポットが得られ、サブピークによる集光特性の劣化は観測されない

(3) サブピークの幅:  $0.8 \times \lambda \times (1 + 0.7(1/NA - 1)) \sim$  集光スポットにサブピークが現れ、集光特性が劣化するという結果が得られた。

【0232】すなわち、サブピークによる集光特性の劣化を防止するためには、サブピークの幅を、 $0.8 \times \lambda \times (1 + 0.5(1/NA - 1))$ 程度以下に抑える必要がある。更に、サブピークの幅を0.8λ以下になるように導波路を設計すると、集光レンズの回折限界より更に小さな集光スポットが得られて、非常に有効である。また、使用するレンズの回折限界(0.8λ/NA)より集光スポットの幅が大きいと、集光スポットは導波モードとほぼ等しい形状を有し、サブピークを持つ2ピークの集光スポットとなって、単一ピークの集光スポットは得られない。

【0233】導波光のサブピークの大きさは、第2のプロトン交換領域6の屈折率及び深さに依存し、第2のプロトン交換領域6の深さが大きくなると、サブピークの幅も増大する。また、第2のプロトン交換領域6の表面屈折率が減少すると、第1のプロトン交換領域5との屈折率差が低下し、サブピークの幅が増大する。アニール処理により第2のプロトン交換領域6をステップライクなグレーディッド形状にする場合、サブピークの幅の増大を限定しなければ、上述したように、導波光の集光特性が劣化する。集光特性を劣化させないためには、第2のプロトン交換領域6の表面屈折率を、アニール処理により低下させないことが好ましい。更に、第2のアニール処理による第2のプロトン交換領域6の広がり（深さの増加）を、アニール前の1.8倍以下に抑えることが、より好ましいことが分かった。

【0234】なお、本実施形態では、短波長光源において基本波P1を高調波P2に波長変換する際に、回折限界以下の幅のサブピークを有する高次モードに変換しているが、その他に、サブピークを有する導波光を集光すれば、同様の効果が得られる。例えば、周期状のグレーディング構造を導波路上に設けて、TE00モード導波光をTE10モードの導波光に変換し、これを集光することで、超解像効果による回折限界以下の集光スポットを得ることができる。

【0235】また、上記では、サブピークが一つのTE10モードを用いているが、更に高次の導波モードでも、サブピークの幅が回折限界であれば、同様の効果が得られる。例えば、メインピークの両側にサブピークを有するTE20モードであれば、超解像効果は更に強くなり、より小さなスポット径が得られて有効である。また深さ方向だけでなく、幅方向にサブピークを有するTE01モード或いはTE02モード、及び幅と深さとの両方向にサブピークを有するTE11モード或いはTE22でも、より小さな集光スポットが得られて、有効である。

【0236】更に、上記の本実施形態の説明ではTEモードを扱っているが、その他に、TMモードを使用しても、同様の効果が得られる。

【0237】（第5の実施形態）本実施形態では、本発明の光波長変換素子を用いた他の短波長光発生装置（短波長光源）15について、図13を参照しながら説明する。

【0238】前述した実施形態による光波長変換素子の構成により、高効率で安定な光波長変換素子の実現が可能となった。そこで、本光波長変換素子を用いた短波長光源の作製を試みた。この短波長光源15は、図13に示すように、波長800nm帯の半導体レーザ21、集光光学系24及び25、並びに光波長変換素子22を含む。これらの半導体レーザ21、集光光学系24及び25、並びに光波長変換素子22は、適切な形状の支持部

材20に搭載されている。

【0239】この構成において、半導体レーザ21から出射された光P1を、集光光学系24及び25を介して光波長変換素子22の導波路2の端面に集光して、導波モードを励起する。そして、光波長変換素子22の導波路2の他の端面より、波長変換された第2高調波光（SHG光）P2が出射される。

【0240】本発明によって波長変換効率が高い光波長変換素子22が実現されているために、図13の構成において、出力100mW程度の半導体レーザ21を用いて、20mWの青色SHG光P2が得られる。また、用いた光波長変換素子22は耐光損傷性に優れ且つ安定な出力が得られるので、出力変動を2%以下に抑えることができて、安定な出力が得られた。この短波長光源15によって得られる400nm帯の波長は、印刷製版、バイオエンジニアリング、蛍光分光特性などの特殊計測分野、或いは光ディスク分野など、広い応用分野において望まれている。本発明の光波長変換素子を用いた本実施形態の短波長光源は、出力特性及び安定性の両方の観点から、これらの応用分野での要求事項を満たしている。

【0241】図13の構成では、半導体レーザ21からの光P1を、集光光学系24及び25を用いて波長変換素子22の光導波路2に結合させているが、半導体レーザ21と光導波路2（波長変換素子22）とを直接結合させることも可能である。例えば、TEモードを伝搬させる光導波路を用いれば、半導体レーザの導波モードと光導波路における導波光の電界分布とを等しくすることが可能となるため、集光レンズなしでも、高効率の結合が実現される。実験では、結合効率80%で直接結合が可能であり、レンズを介した結合と、ほぼ同等の結合特性が得られることを確認した。直接結合を使用すれば、小型で且つ低価格の短波長光源が実現できて、有望である。

【0242】（第6の実施形態）本実施形態では、本発明による光情報処理装置について、図14を参照して説明する。

【0243】図14に示す光情報処理装置500の構成において、第5の実施形態で説明した半導体レーザ521及び光波長変換素子522を含む構成を有する短波長光発生装置（短波長光源）520から出た出力10mWのビームP1は、コリメータレンズ540によってコリメートされた後に、ビームスプリッタ541を透過し、レンズ542により、情報再生媒体である光ディスク543に照射される。光ディスク543からの反射光は、逆にレンズ542によりコリメートされ、ビームスプリッタ541でディテクタ545の方向に反射されて、レンズ544によってディテクタ545に集光される。ディテクタ545では、集光された光から、信号が読みとられる。

【0244】更に、短波長光発生装置520の出力を強



度変調することで、光ディスク543に情報を書き込むことができる。短波長光発生装置520から出力されるのはサブピークを有するTE10モードの光であるが、これを集光すると、レンズ542の回折限界以下である小さなスポット径を有する集光ビームが得られる。これより、短波長光による集光特性に加え、超解像効果による小さなスポット径が得られて、記録密度を従来の1.2倍に向上させることが可能となる。

【0245】このように、本発明の光波長変換素子は、耐光損傷強度に優れ、高出力の青色光の発生が可能となるため、光ディスクからの情報の読み取り（再生）だけではなく、光ディスクへの情報の書き込みのために使用されることも可能である。更に、長時間の高温試験に対しても特性の劣化のない素子であるため、光情報処理装置の温度特性を改善することが可能になる。また、半導体レーザを基本波の光源として用いることで、全体サイズ的大幅な小型化が達成され、民生用の小型の光ディスク読み取り／記録装置にも利用できる。

【0246】（第7の実施形態）図15は、第7の実施形態の光波長変換素子100の構成を示す斜視図である。この光波長変換素子100は、 $MgO:LiNbO_3$ （マグネシウムをドーピングしたニオブ酸リチウムからなる）基板101の表面近傍に、例えば4本の互いに平行な分極反転領域102が一定の間隔で配置され、周期的な分極反転構造が形成されている。さらに、この基板101の表面近傍には、分極反転領域102と交差（ここでは直交）する方向に配置された、例えば3本の光導波路103a、103b、103cからなる光導波路群103が形成されている。この光導波路群103に入射された基本波104は、光導波路群103内を伝搬して光導波路103a、103b、103c内で高調波または和周波105に変換され、入射部とは反対側の出射部から出射する。

【0247】この光波長変換素子100は、例えば以下のようにして作製することができる。まず、基板にくし形電極を形成し、これに高電圧を印加することにより分極が反転した領域を部分的に有する周期状分極反転構造を形成する。そして、光導波路形成用のストライプ状マスクパターンを形成した後、基板を酸性溶液中で処理することによってプロトン交換を行って光導波路を形成する。

【0248】このように構成された本実施形態の光波長変換素子100では、光導波路の吸収損失を低減して耐光損傷強度を向上することが可能となり、基本波から高効率で波長変換が可能となり、さらに、変換された波長光の集光特性が向上可能である。まず、耐光損傷強度の向上に関して説明する。

【0249】光損傷の発生原因としては、発生した高調波または和周波により光誘起屈折率変化が生じることが挙げられる。この光誘起屈折率変化は光導波路の光吸収

性に依存する。一方、プロトン交換により光導波路を形成する場合、プロトン交換後にアニール処理を行って光吸収を低減することができるが、初期のプロトン交換により基板表面に化学損傷を受けるため、表面近傍の光散乱や光吸収が生じ易くなる。よって、初期のプロトン交換面積を小さくすることが望ましい。しかしながら、プロトン交換面積を小さくするために光導波路の幅を狭くすると、基本波がカットオフされやすく、光導波路内で基本波と高調波または和周波のオーバーラップが最適となる条件が得られない。本願発明者らの実験によれば、例えば波長850nmの基本波から波長425nmの第2高調波に変換する場合、最適な光導波路幅は4 $\mu m$ ～6 $\mu m$ 程度であり、3 $\mu m$ 以下では変換効率が大幅に低くなるという結果が得られた。そこで、本実施形態のように、複数の光導波路からなる光導波路群を用いることにより、光導波路および光導波路群の幅を自由に設計することができ、かつ、プロトン交換面積を小さくすることができる。

【0250】さらに、プロトン交換による化学損傷は、プロトン交換体積に比例して増大する。これは結晶歪みに起因する現象であり、プロトン交換体積が増大すると、歪みの大きさによって結晶表面にクラックが入る。これを防ぐため、光導波路を分割して複数の光導波路からなる光導波路群とすることにより、プロトン交換面積および体積を減少させて、結晶の化学損傷を大幅に低減することができる。

【0251】本実施形態では、幅1.4 $\mu m$ の光導波路103bを基板101の中央に形成し、その両側に1 $\mu m$ 間隔を開けて幅1 $\mu m$ の光導波路103a、103cを形成した。これにより、波長850nmの基本波104は、各光導波路幅ではカットオフ条件となり、3本の光導波路103a、103b、103cを1本の光導波路としてシングルモード伝搬させることができた。また、プロトン交換面積を大幅に小さくして、光導波路の伝搬損失を1.5dB/cmから0.8dB/cmと半分程度に低減することができた。この結果、光導波路の光吸収を低減して、耐光損傷強度を約2倍と大幅に増大することが可能となった。

【0252】次に、基本波から高調波または和周波への変換効率の向上について説明する。ここでは、第2高調波または和周波を発生させる場合について説明する。

【0253】第2高調波を発生させる場合には、波長 $\lambda$ の基本波に対して波長 $\lambda/2$ の高調波が発生する。また、和周波を発生させる場合には、波長 $\lambda_1$ と波長 $\lambda_2$ の光から波長 $\lambda_3$ の高調波が発生する。いずれの場合も、基本波の波長が変換された波長光の波長に対して長い。これらの場合、光導波路群に要求されるのは、複数の光導波路を合わせた状態で基本波がシングルモード伝搬するという特性である。例えば3本の光導波路からなる光導波路群の場合、光導波路群を構成する光導波路が



1本で、または2本合わせた状態で、基本波に対して導波条件を満足しないように光導波路を設計する必要がある。導波路群が基本波に対してシングルモード伝搬の条件を満足しない場合には、基本波の導波条件が伝搬中に変化するおそれがあるため、安定して波長変換を行うことが困難である。すなわち、光導波路群を伝搬する基本波は、図16(a)に示すように、光導波路群103を1つの光導波路としてシングルモードの電界分布で導波する。これに対して、変換された高調波または和周波は、図16(b)に示すように、例えば中央の光導波路103bを選択的に伝搬する導波モードの電界分布で伝搬する。

【0254】従って、本実施形態において、光導波路は、

- ・基本波は導波路群をシングルモード伝搬し、
- ・変換された波長光は光導波路を伝搬するように設計を行い、異なる伝搬状態である基本波と変換された波長光との間で位相整合条件を成立させる。高調波または和周波の導波モードは、例えば基本波の波長を制御することで実現することができる。

【0255】このように構成された光導波路を用いることで、高効率で波長変換可能な光波長変換素子を実現可能であった。この理由としては、第1に、基本波と変換された波長光の電界分布のオーバーラップを大幅に高めることが可能となったことが挙げられる。従来においては、基本波の導波モードの電界分布と高調波の導波モードの電界分布を独立して制御することは困難であった。これに対して、本実施形態では、基本波の伝搬モードは導波路群で制御し、高調波または和周波等の変換された波長光の伝搬モードは導波路群を構成する光導波路によって制御することができる。この結果、基本波と変換された波長光のオーバーラップを高めることが可能となった。第2の理由としては、高調波または和周波等の変換された波長光の閉じ込めが強化されたことが挙げられる。従来の光導波路において、基本波が伝搬可能なものは、高調波に対してはマルチモード伝搬となるため、高調波の閉じ込めを充分行うことが困難であった。これに対して、本実施形態のような光導波路構造によれば、変換された波長光に対しても光導波路をシングルモード伝搬させることができる。これによって、高調波または和周波のパワー密度を大幅に向上させることが可能となった。このように、基本波および変換された波長光の電界分布のオーバーラップの増大と、高調波または和周波の光の閉じ込め向上により、変換効率を飛躍的に向上させることができた。

【0256】もう一つの特徴として、変換された波長光の集光特性の向上について説明する。従来の光導波路構造では、高調波に対してはマルチモード伝搬となるため、出射される高調波出力ビームは縦横比が1:3以上のものになっていた。このような出射光を集光するため

には、ビーム整形を行ってビーム形状を1:1に近い値にする必要があった。これに対して、本実施形態のような光導波路構造によれば、変換された波長光がシングルモード伝搬可能であるので、出射ビームの横方向広がりを抑えることが可能となり、出射ビームの縦横比も1:1.5まで向上させることが可能となった。これによって、集光特性を大幅に向上させることができた。

【0257】さらに集光特性を向上させるためには、図17に示すような構造が有効であった。この構造は、光波長変換素子の光導波路群103を構成する光導波路の本数を出射部107近傍で異ならせて、一本の光導波路にした構成である。光導波路103bは単独では基本波104に対してカットオフ条件を満たしているため、基本波104は放射モードとなって出射部107近傍で放射される。このため、出射ビームに基本波成分が混在しないという特徴があり、さらに、出射端で発射された基本波が光源に戻って光源の出力を不安定にするという問題も解決することができた。さらに、出射部107近傍で単一の光導波路にすることで、出射ビームの縦横比をさらに1:1.3まで向上させることも可能となった。

【0258】さらに、本願発明者らが本実施形態の光導波路構造について実験を行った結果、以下のような点に注意する必要があることが明確になった。

【0259】第1に、光導波路群を構成する各光導波路の伝搬特性について、注意が必要であることが分かった。各光導波路が共に等しい伝搬定数 $(= (2\pi/\lambda) \times N)$ 、 $\lambda$ :波長、 $N$ : $\lambda$ に対する実効屈折率)を有する場合、光導波路群を伝搬する基本波とそれぞれの光導波路を伝搬する高調波または和周波の位相整合波長が一致する。このため、特定の光導波路を伝搬する高調波または和周波を選択的に発生させることが困難になって、変換効率が低下し、さらに、出射される高調波または和周波も複数ビームの出射パターンとなった。また、各光導波路の伝搬定数が近い場合、光導波路間の結合が発生して、ある光導波路を伝搬する高調波または和周波が他の光導波路に乗り移るという現象も観測された。この場合、光の伝搬状態が変化することとなり、出力光が安定しないという問題も生じるので、高調波または和周波を発生させたい光導波路と他の光導波路との伝搬定数は大きく異なっていることが望ましい。この問題を解決するためには、光導波路の伝搬定数が異なるように導波路を設計する必要がある。例えば、本実施形態のように、3本の光導波路からなる場合は、中央の光導波路と両端の光導波路の伝搬定数が0.1%程度異なるように設計するのが望ましい。例えば、光導波路の幅、屈折率や光導波路の深さを変えることにより、容易に伝搬定数が異なる光導波路を形成することができる。

【0260】第2に、光導波路群を構成する各光導波路間の間隔を十分開ける必要があることが分かった。光導波路の形成は、通常、プロトン交換または金属拡散等の

方法で行われ、いずれの方法においてもプロトンや金属を基板内部に拡散させる方法で光導波路を形成する。このため、フォトリソグラフィ法により光導波路パターンを形成しても、内部に拡散するに従って互いの光導波路が接触するという問題が生じる。本願発明者らが光導波路の間隔として幾つかの値について検討したところ、 $0.5\mu\text{m}$ 以下では隣接する光導波路が完全にくっついて単一の光導波路となってしまうため、光導波路間隔を $0.8\mu\text{m}$ 以上にするのが好ましいことが分かった。

【0261】以上説明したように、本実施形態の光波長変換素子によれば、

- ・表面の化学損傷の低減により耐光損傷強度が向上する
  - ・光導波路の低損失化が可能である
  - ・導波モード間のオーバーラップの向上により変換効率が向上する
  - ・出射光のビーム形状を最適化できるため、集光特性が向上する
- 等の効果が得られる。

【0262】なお、変換効率の高効率化を実現するためには、光導波路群の構造が中心対称であって、光導波路群を構成する光導波路が奇数本であるのが好ましい。光導波路を中心対称にするのが好ましい理由は、導波光（変換された波長光および基本波）の伝搬モードが左右対称な構造となるためである。導波光の伝搬モードが左右非対称な構造であると、出射光のビーム形状が非対称となり、集光特性が劣化する。また、基本波と変換された波長光の非対称性が異なるため、オーバーラップの低下を招いて変換効率が低下する。また、光導波路の本数を奇数にするのが好ましい理由は、光導波路群の中央の光導波路に高調波または和周波が発生する場合に、高い変換効率を得られるからである。光導波路群を伝搬する基本波と光導波路を伝搬する変換された波長光間で最もオーバーラップが高くなるのは、導波路群の中央の光導波路を高調波または和周波が伝搬する場合である。これは、パワー密度の高い部分が基本波および変換された波長光ともに中央の光導波路に集中するからである。このため、奇数本の光導波路を形成して、中央近傍の光導波路に基本波から変換された波長光を伝搬させる場合が最も高い変換効率を得られる。

【0263】さらに、光導波路の幅または光導波路間隔を、光伝搬方向に対して徐々に変化させることにより、伝搬方向が異なる複数の光導波路とすることができ、図18(a)および図18(b)に示すようなテーパー導波路（形状が伝搬方向に対してテーパー状に狭くなったり、広くなったりしている導波路）や、伝搬定数が伝搬方向に対して分布を有する光導波路を形成することが可能となる。このように光導波路を伝搬方向に対して分布を持たせることにより、位相整合波長が伝搬方向に対して分布を有する光導波路を形成することができる。これにより、例えば光波長変換素子において、位相整合波

長の許容度を拡大する構造を実現することができる。非線形光学効果を利用した光波長変換素子においては、位相整合波長の許容度が狭いため、位相整合条件を精密に制御する必要がある。よって、光導波路の伝搬定数に分布を持たせて、位相整合波長の許容度を拡大することにより位相整合条件を緩和し、安定した出力特性を実現可能であるということは非常に有用である。

【0264】なお、本実施形態および後述する第8の実施形態において、光導波路を形成する方法としては、耐光損傷強度の向上を実現可能なプロトン交換が有効な手段である。その他にも、例えばTi拡散、Zn拡散、In拡散、Sc拡散等の金属拡散により形成した光導波路に対しても適用可能である。金属拡散においても、基板表面荒れの問題は深刻であり、表面荒れによる耐光損傷強度の低減が問題となる。このような表面荒れは、拡散面積に比例して大きくなるため、金属拡散される表面積を小さくすることにより、表面荒れを大幅に低減することができ、また、表面荒れの面積も小さくすることができる。このため、光損傷の原因である光の吸収を少なくして、耐光損傷強度を大幅に向上することができる。

【0265】なお、本発明の光波長変換素子は、差周波やパラメトリック等を発生させる光導波路構造についても適用可能である。この場合、基本波は発生する光に対して波長が短いため、光導波路の設計が一番の問題となる。差周波やパラメトリックを発生させる場合、光導波路は基本波および変換された波長光が共に伝搬可能な構造であることが必要である。ところが、この条件を満足する光導波路は、基本波に対してマルチモードとして働く。このため、光導波路に励起される基本波は幾つかの伝搬モード（マルチモード）に分かれて伝搬する状態となり、パワーが分散されて変換効率が大幅に低減してしまう。そこで、以下の第8の実施形態では、本発明をパラメトリックを発生させる光波長変換素子に適用した例について説明する。

【0266】（第8の実施形態）図19は、第8の実施形態の光波長変換素子110の構成を示す斜視図である。この光波長変換素子110は、 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ からなる基板101の表面近傍に、第10の実施形態1と同様に周期的な分極反転構造（周期は第7の実施形態と異なる）が形成されている。さらに、この基板101の表面近傍には、分極反転領域102と交差（ここでは直交）する方向に配置された、例えば3本の光導波路103a、103b、103cからなる光導波路群103が形成されている。入射部近傍では光導波路103b一本のみが形成され、途中から複数の光導波路103a、103cが形成されている。この光導波路103bに基本波104が入射されると、光導波路内103bを伝搬して光導波路群103を伝搬するパラメトリックまたは差周波105aに変換され、入射部とは反対側の出射部から出射する。この光波長変換素子は、第7の実

形態と同様にして作製することができる。

【0267】次に、本実施形態の光波長変換素子110の動作原理について説明する。この光波長変換素子では、光導波路103bにおいて基本波104を励起し、光導波路群103を伝搬するパラメトリックまたは差周波105aに波長変換する。このとき、光導波路103bに励起された基本波が導波路103a、103cに伝搬しないように、光導波路103bと光導波路103a、103cが異なる伝搬定数を有するように設計している。例えば、光導波路の幅を変えることにより、容易に伝搬定数が異なる光導波路を形成することができる。本実施形態では、幅1.4  $\mu\text{m}$ の光導波路103bを基板101の中央に形成し、その両側に1  $\mu\text{m}$ 間隔を開けて幅1  $\mu\text{m}$ の光導波路103a、103cを形成した。これにより、基本波がシングルモード伝搬で光導波路103bを伝搬することが可能となり、光導波路群103において光導波路群103を伝搬するパラメトリックまたは差周波に変換される。光導波路を共にシングルモード伝搬する基本波とパラメトリック間または基本波と差周波間で位相整合することが可能となるため、高効率でパラメトリックまたは差周波を発生させることができた。さらに、本実施形態においても、第7の実施形態と同様に、プロトン交換面積を小さくすることができるので、表面の化学損傷を低減して耐光損傷強度の向上を図ることが可能である。なお、本実施形態において、入射部近傍に光導波路103a、103cを形成しない理由は、光導波路103bに基本波を励起する場合に、隣接する光導波路に光が励起されるのを防ぐためである。

【0268】さらに、複数の光導波路からなる光導波路群は、光導波路の入射部および出射部として用いることで、光導波路の結合効率の向上、および出射ビーム整形に利用することも可能である。この場合は、入射部近傍または出射部近傍に光導波路群を形成して、単一の光導波路と接続することにより、入射部または出射部のビーム形状を制御することができる。光導波路の設計によって単一の光導波路と光導波路群との結合効率も大きく取ることができるため、低損失でビーム整形が可能な光導波路構造として利用することができる。

【0269】例えば、入射部に光導波路群を利用する場合には、光導波路を伝搬方向に分割することで、入射部の伝搬モードを広げる入射テーパ構造をとることができる。この場合、直線状の光導波路の入射部近傍に複数の光導波路からなる光導波路群を形成することにより、入射部を複数の光導波路に分割する。これにより、プロトン交換される面積が減少するため、屈折率変化量が低下し、光導波路がカットオフ条件に近づいてモードの分布が広がって大きくなる。これを利用して入射部の伝搬モードを拡大し、入射テーパを形成することができる。また、出射部に光導波路群を利用する場合には、上述した様に光導波路のビームアスペクト比が改善されるため、

導波モードのアスペクト比が改善されて、出射ビーム整形が可能となる。

【0270】さらに、本願発明者らは、耐光損傷強度の向上を目的としたプロトン交換導波路について、新たな結晶特性を見出した。そこで、以下の第9の実施形態では、耐光損傷強度の向上を図った他の本発明の例について説明する。

【0271】(第9の実施形態)  $\text{LiNbO}_3$ を用いた光波長変換素子を用いた場合の光損傷の原因としては、結晶中の欠陥が挙げられる。すなわち、光により励起される電界によって電荷が移動し、その電荷が結晶欠陥中にトラップされることにより内部電界が維持され、これが電気光学効果を介して屈折率変化を誘起して、光損傷を発生させるのである。 $\text{LiNbO}_3$ はチョコラルスキー法により結晶育成され、育成条件の安定しているコングレント組成をとっている。コングレント組成とは、 $\text{Li}$ のmol濃度比が48mol%、 $\text{Nb}$ のmol濃度比が52mol%程度であって、完全結晶から僅かに組成比のずれた結晶組成比の状態のことである。

【0272】プロトン交換層におけるプロトン交換層中の $\text{Li}$ モル濃度比は結晶中の $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Nb}_2\text{O}_5$ のそれぞれのモル数に対して以下の式で表される。

$$\text{Liのモル濃度比}(\%) = \text{Li}_2\text{O} / (\text{Li}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + \text{Nb}_2\text{O}_5) * 100(\%)$$

の式で表される。

【0273】金属添加物を $\text{LiNbO}_3$  1molに対し金属元素Zmol添加した場合、

$$\text{金属元素のmol濃度} : \text{Zmol} * 100(\%)$$

となる。

【0274】ここで言うmol濃度比とは、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶中に存在する $\text{Li}$ と $\text{Nb}$ のmol濃度の比率を表し、結晶中では $\text{Li}$ のmol濃度比と $\text{Nb}$ のmol濃度比を加えた値は100mol%である。完全な結晶の場合には、 $\text{Li}$ と $\text{Nb}$ が同じmol数だけ存在するので、それぞれのmol濃度比は50mol%である。このため、コングレント組成の結晶構造には多くの欠陥が存在する。 $\text{LiNbO}_3$ の結晶欠陥モデルには、幾つかの説が提唱されているが、特に強く支持されているモデルに $\text{Li}$ 欠陥モデルがある。この結晶モデルは、定組成比からずれた $\text{Nb}$ が結晶中の $\text{Li}$ サイトに存在し、さらに $\text{Li}$ サイトの空位欠陥が存在するモデルである。

【0275】従来から、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶に特定の金属元素である $\text{Mg}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Sc}$ 、 $\text{In}$ 等を添加して、結晶欠陥を添加金属で埋めることにより耐光損傷強度を向上させる方法が提案されている。これらの添加金属が結晶に添加されると、まず、 $\text{Li}$ サイトに存在する空位が添加金属で埋められ、さらに、 $\text{Li}$ サイトに存在する $\text{Nb}$ が添加金属で置換されることにより、結晶の欠陥(空位)がなくなって耐光損傷強度が向上する。耐光損傷強度は、金属元素の添加量が、 $\text{Li}$ サイトの空位がなくな

る程度の量を越えた時点から急激に向上する。この値は、コングルエント組成の $\text{LiNbO}_3$ の場合には、5 mol%程度のMg添加量またはZn添加量に相当する。

【0276】本願発明者らは、このような金属元素を添加した $\text{LiNbO}_3$ 結晶に対してプロトン交換を行った場合に、結晶欠陥が増加することを見出した。すなわち、 $\text{LiNbO}_3$ は金属添加によって結晶欠陥が低減されるが、プロトン交換は結晶中のLiをプロトンと交換する方法であるため、Liサイトの欠陥を大幅に増大させる。これは、プロトン交換によるLiの交換量は数10%にも達し、Liサイトの正しい位置にプロトンが交換される割合がすくないこと、および $\text{LiNbO}_3$ が3方晶の結晶構造をとるのに対して、 $\text{HNbO}_3$ は立方晶の結晶構造をとるため、プロトン交換層の結晶歪みが大きいこと、の2点に起因する。よって、プロトン交換層の耐光損傷を向上させるには、結晶歪みを低減し、かつ、プロトンを正しいLiサイトに落ち着かせる必要がある。本願発明者らは種々の実験を行って、アニール処理によりこれらの問題を解決可能であること、特に、アニール後のプロトン濃度を特定の規定量以下（例えば数%程度）にすることにより耐光損傷強度が大幅に増大することを見出した。アニール処理を行うと、プロトンの熱拡散によってプロトン濃度が低下し、結晶歪みが大幅に低減する。さらに、アニール処理によって、プロトンを存在すべきLi位置に据え置くことが可能となる。

【0277】しかしながら、結晶中のプロトン濃度が高い場合には結晶歪みが残り、結果的にLiサイトの欠陥が十分除去されないことが判明した。本願発明者らの実験によれば、アニール処理を行わないプロトン交換層の場合には、電気光学定数が大幅に減少するため、電気光学効果による屈折率変化は発生しない。しかし、アニール処理によりプロトン濃度を低くした場合には、アニールにより光損傷が顕著になり、さらにアニールを続けると光損傷が低下する。特に、光波長変換素子に利用するプロトン交換導波路においては、非線形光学効果を高めるためにアニール処理が必須であるため、光損傷が顕著となる。プロトン交換により形成した光導波路を非線形光学素子に適用する場合には、光導波路として使用する状態で耐光損傷強度を十分に強い状態にする必要がある。そこで、本願発明者らは、以下のようにして耐光損傷強度に優れたプロトン交換光導波路の特性について検討を行った。

【0278】まず、第一に、プロトン交換光導波路におけるプロトン交換濃度と耐光損傷強度との関係について検討を行った。コングルエント組成の $\text{LiNbO}_3$ にMgを5 mol%ドーパした基板を用いて、プロトン交換時間およびアニール時間を制御し、光導波路中のプロトン交換濃度と耐光損傷強度の関係を測定した。その結果を図20に示す。プロトン交換を行った直後はLiのm

ol濃度比が20 mol%前後に低下しているが、このときの耐光損傷強度は非常に高い。但し、アニール処理を全く行わない場合には、非線形定数が低下するため、変換効率が低下する。そして、アニール処理によりプロトン濃度が低下してLi濃度が増大すると、耐光損傷強度は徐々に低下する。さらに、アニール処理を行ってLi濃度が30 mol%以上になると、再び耐光損傷強度が増加する。これは、プロトン濃度の低下によって結晶欠陥が減少した結果と考えられる。よって、耐光損傷強度を増加させるためには、プロトン濃度を低下させる必要があり、Liのmol濃度比を40 mol%以上に回復させるのが好ましいことが分かった。さらに、Liのmol濃度比が43 mol%以上であれば、耐光損傷強度がプロトン交換前の結晶の90%以上になるので、より好ましい。

【0279】以上のように、プロトン交換層をアニール処理してプロトンの濃度を十分低減させることにより、耐光損傷強度をプロトン交換前の結晶とほぼ同等まで回復させることが可能であることが分かった。しかしながら、アニール処理したプロトン交換層は、プロトン濃度が低いために屈折率変化が小さく、光導波路の閉じ込めを強くすることが困難であるという問題が残る。この問題を解決するには、プロトン交換層のプロトン量が多い場合でも、結晶内の欠陥密度を低減可能な構造が必要になる。本願発明者らは、上述した欠陥モデルから考察して、プロトン交換層における結晶欠陥を完全に無くすために、プロトン交換により増大する結晶欠陥を十分埋めることが可能な量のLiまたは添加金属を、予めプロトン交換層を形成する結晶内に存在させるようにすれば、この問題を解決可能であると考えた。従来、添加金属の量としては、例えばMgの場合には、5 mol%程度が最適であると考えられており、5 mol%程度を越え、結晶欠陥が増大すると同時に吸収が増大するため、耐光損傷強度が低下すると報告されていた。しかしながら、これは、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶自体に対しての量であり、 $\text{LiNbO}_3$ に形成したプロトン交換光導波路に対するものではない。本願発明者らの実験により、プロトン交換光導波路の耐光損傷強度を向上させるためには、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶における最適値よりも高い濃度の添加物を加えて、プロトン交換層を形成した場合に結晶欠陥が無くなる構造とすることが明らかになった。

【0280】実験では、Li濃度および添加金属濃度が種々異なる結晶を引き上げ、プロトン交換を行った層の耐光損傷強度を測定した。その結果、プロトン交換層の耐光損傷強度は、プロトン交換層におけるLiのmol濃度比Yと添加金属のmol濃度Zを加えた値Y+Zに強く依存することを見出した。なお、Liのmol濃度比とは結晶中におけるLiとNbとの比率であり、理想的な結晶の場合にはLiとNbのmol濃度比は50 mol%となる。通常の結晶（コングルエント組成）で

は、Liのmol濃度比は48mol%、Nbのmol濃度比は52mol%程度である。添加金属のmol濃度は、 $\text{LiNbO}_3$ 結晶1molに対して添加金属が何mol含まれているかを%で示したものである。

【0281】図21は、 $Y+Z$ の値と耐光損傷強度の関係を求めた値である。 $Y+Z$ の値が20mol%以下の場合には、結晶の電気光学効果が殆どなくなるため、耐光損傷強度は大幅に増大する。 $Y+Z$ が34mol%～40mol%では耐光損傷強度が低下し、45mol%ではほぼMgを5mol%ドープした $\text{LiNbO}_3$ と等しい耐光損傷強度を示した。Li濃度および添加金属濃度で耐光損傷強度は僅かに異なるが、 $Y+Z$ の値が48mol%以上の結晶では何れも、Mgを5mol%ドープした $\text{LiNbO}_3$ 基板と同等の耐光損傷強度が得られ、強い耐性を有していることが確認できた。従って、プロトン交換層における $Y+Z$ の値が48mol%以上になることがより好ましい。これは、プロトン交換により生じる結晶欠陥が添加金属とLiにより補われるためと考えられる。プロトン交換により結晶中のLiがプロトンに置き換わるため、結晶内のLiサイトに欠陥が増大する。これを熱処理することにより、交換されたプロトンは結晶内の最適な位置に移動するが、Li結晶欠陥を完全に埋めることはできない。そこで、プロトン交換層を熱処理し、プロトンを最適な位置に移動させた状態において、発生する程度の結晶欠陥を防止できるだけの量のLiと添加金属を予めプロトン交換される結晶部分に存在させることにより、プロトン交換層の結晶欠陥を限りなく低減することが可能となる。この値がLiのmol濃度比Yと添加金属のmol濃度Zの和が45mol%～50mol%以上になる値である。

【0282】ところで、通常の市販されているMgOを5mol%ドープしたコングルエント組成の結晶から目的とする結晶を作製するのは難しい。その理由は以下の通りである。市販されている結晶では、Liのmol濃度比とMgのmol濃度を加えた値は53mol%程度であり、プロトン交換を行うとこの値が20mol%程度に低下する。これをアニール処理しても、周辺の濃度が53mol%と低いため、プロトン交換層の濃度が48mol%を超えるのは困難であった。これは、Liのmol濃度比と添加金属のmol濃度の和が48mol%以上となる程度までプロトン濃度を低下させると、光導波路と基板の屈折率差が小さくなるため、断面積が小さく閉じ込めの強い光導波路を形成が困難になるからである。

【0283】これを解決するためには、以下のような方法が考えられる。第1は、添加金属のmol濃度を向上させる方法である。例えば、コングルエント結晶(Li濃度比48mol%)にMgを7molドープした場合、Liのmol濃度比とMgのmol濃度の和は55mol%となる。プロトン交換とアニール処理によりプ

ロトン交換層のLiのmol濃度比とMgのmol濃度の和を48mol%にすると、耐光損傷に優れた光導波路を形成することができた。第2は、結晶のLi濃度を増加させる方法である。例えば、完全結晶である $\text{LiNbO}_3$ (Liのmol濃度比が50mol%)にMgを5mol%添加した結晶である。Liのmol濃度比と添加金属のmol濃度の和は55mol%である。これにプロトン交換を行った後、アニール処理を加えることで、Liのmol濃度比と添加金属のmol濃度の和は50mol%を超えることが可能になり、耐光損傷強度の強いプロトン交換光導波路の形成が可能となった。何れの場合も、基板自体は最適な組成からのずれが大きくなるので、耐光損傷強度は最適な値より低下したが、プロトン交換層において最適な構造をとることで、光導波路自体は耐光損傷強度が大幅に向上した。よって、プロトン交換を行った光導波路において、耐光損傷強度の優れた結晶構造を実現できた。Liのmol濃度比または添加金属のmol濃度をさらに上昇させると、アニール処理が少ない場合(即ちプロトン濃度が高い場合)でも、耐光損傷強度の強い光導波路を形成することが可能となった。この場合、光導波路と基板の屈折率変化を大きく取ることができるため、さらに閉じ込めの強い光導波路の形成が可能となり、高効率の光波長変換素子の形成が可能となった。なお、Liのmol濃度比は50mol%以下であるのが好ましく、これを超えると結晶欠陥が増大する。

【0284】また、Liのmol濃度比の高い光導波路を用いると、光導波路の非線形光学定数が増加するため、高効率の光波長変換素子が形成できた。この理由は、以下の通りである。プロトン交換光導波路内におけるLiのmol濃度比は非線形光学定数に影響する。Liのmol濃度比を45mol%以上にすると、40mol%以下にした光導波路に比べて、非線形光学定数は1.05倍程度となり、変換効率は1.1倍に向上した。さらに、金属添加により金属添加物のmol濃度とLiのmol濃度比の和が50mol%以上になると、非線形光学定数は1.1倍程度になり、変換効率は1.2倍に向上した。プロトン交換光導波路内のLi濃度比を制御することは、高効率化においても非常に有効である。

【0285】なお、本実施形態では、 $\text{LiNbO}_3$ 基板について説明したが、 $\text{LiTaO}_3$ 、または $\text{LiNbO}_3$ と $\text{LiTaO}_3$ の混合物である $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ ( $0 \leq x \leq 1$ )でも、同様の効果が得られた。また、金属添加物は、Mg、Zn、In、Scの単体または複数の金属元素を同時に添加しても有効であった。LiTaO<sub>3</sub>、および $\text{LiNbO}_3$ と $\text{LiTaO}_3$ の混合物である $\text{LiNb}_x\text{Ta}_{1-x}\text{O}_3$ ( $0 \leq x \leq 1$ )は、 $\text{LiNbO}_3$ と同様のコングルエント組成および耐光損傷特性を有し、プロトン交換による光損傷特性の変化も同様の特性を有

する。すなわち、結晶欠陥の増大により耐光損傷強度が低下するという特性である。従って、プロトン交換層におけるLi欠陥の防止方法として、Liまたは金属添加物を予め多めに添加することで、プロトン交換による結晶欠陥の増大を防止することができる。

【0286】なお、結晶中のLi濃度を増大させる方法としては、Liを熱拡散する方法も挙げられる。LiNbO<sub>3</sub>基板を、Liを含むパウダー中で1000℃～1100℃程度の温度で熱処理すると、LiがLiNbO<sub>3</sub>表面に拡散し、表面近傍にLi濃度の高い結晶を形成することができる。光導波路に使用するの、基板表面近傍の数μmであるため、この方法により得られた基板に形成したプロトン交換層は、強い耐光損傷強度を示した。

【0287】さらに、結晶中の金属添加物を増大させる方法としては、結晶を引き上げる際の添加量を増大させる以外に、金属を熱拡散させる方法がある。例えば、Znの場合には、LiNbO<sub>3</sub>上にZnO膜を堆積し、これを1000℃程度で熱処理することによりZnが結晶に拡散して、基板の表面近傍に金属添加物濃度が高い層が形成される。この層中にプロトン交換光導波路を形成することで、耐光損傷強度に優れた光導波路を形成することができる。

【0288】なお、添加する金属は、単一の金属元素でも、上記金属元素の複数を同時に添加しても、同等の効果が得られた。

【0289】また、上記Li濃度や金属添加濃度の検討は、直線状の単一光導波路に対して行ったが、第7の実施形態や第8の実施形態で示したような、複数の光導波路からなる光導波路群を用いた光導波路構造に適用することにより、さらなる耐光損傷強度の向上が確認された。すなわち、光導波路群を利用することでプロトン交換面積を小さくして化学損傷を低減することができ、さらに、Li濃度や金属添加濃度を制御することで光導波路自体の耐光損傷強度を向上させることができた。この結果、低損失で高出力特性を有する光波長変換素子を実現することができた。

【0290】(第10の実施形態)本実施形態では、半導体レーザと光波長変換素子を備え、常に安定な出力特性の実現が可能なコヒーレント光発生装置について説明する。本発明のコヒーレント光発生装置の特徴は、耐光損傷強度の優れた本発明の光波長変換素子を用いることにより、安定な出力特性を実現することができるという点である。

【0291】従来の光波長変換素子においては、耐光損傷強度が十分ではなかった。そのため、波長425nm程度の青色光を10mW程度出力すると、光損傷により位相整合波長が変動するという現象が観測された。このため、コヒーレント光発生装置の出力が徐々に変動するという問題があった。これを安定化させるためには、半

導体レーザの発振波長を制御して常にSHG(第2高調波)出力が一定の値をとるように安定化させる必要があり、出力安定化回路が必要であった。これに対して、本発明の光波長変換素子は耐光損傷強度に優れているため、これを用いたコヒーレント光発生装置は、出力安定化回路を必要とせず、簡単な構成で安定した出力を得ることができる。

【0292】図22は本実施形態のコヒーレント光発生装置120の構成を示す斜視図である。このコヒーレント光発生装置120は、第7の実施形態において図15に示したような光波長変換素子121と半導体レーザ122からなり、光波長変換素子121は入射部123と出射部124を有する。半導体レーザ122は、例えばDBRグレーティング構造をLD上に集積化したDBR半導体レーザ、または温度や外部グレーティングにより波長を可変する半導体レーザ等、出射波長を可変できる機能を有する半導体レーザであり、光波長変換素子の位相整合条件を満足する波長に出射波長を合わせることで、コヒーレント光発生装置の出力安定化を図っている。

【0293】このコヒーレント光発生装置120は、光波長変換素子の耐光損傷特性の向上による特性の向上に加えて、以下の特徴を有している。光波長変換素子121としては、3本の光導波路からなる光導波路群を有し、波長850nmの基本波を波長425nmの第2高調波に変換するものを用いている。この光波長変換素子121において、基本波は光導波路群を伝搬し、第2高調波(SHG)は中央の光導波路を伝搬する。SHGは中央の光導波路を伝搬するため、出射ビームのアスペクト比は約1:1.5となった。このため、出射光を集光光学系により集光する場合に90%以上の光を取り込んで集光することが可能となり、光の利用効率が大幅に向上した。従来の構造では、出射光のアスペクト比が1:3以上あったため、アスペクト比改善にプリズム光学系等を必要とし、光の利用効率が低下していた。

【0294】さらに、パラメトリック発振を利用した波長可変コヒーレント光発生装置においては、導波路型デバイスが小さいため、図22に示すように半導体レーザと波長変換素子を直接結合することによりコヒーレント光発生装置の小型化が可能である。例えば、第8の実施形態と同様の周期状の分極反転構造を有する光波長変換素子とレーザ光源を用いることによりパラメトリック発振が可能である。パラメトリック発振は、基本波 $\lambda_3$ を入力すると、光の波長 $1/\lambda_3 = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2$ の関係満足するシグナル光 $\lambda_2$ およびアイドラー $\lambda_1$ を発生し、発生した各光は光導波路群を1つの光導波路としてシングルモード伝搬する。よって、 $\lambda_3$ の基本波から上記条件を満足する波長の光を波長変化させながら出力することができ、波長可変なコヒーレント光発生装置を実現することができる。このコヒーレント光発生装置

に高効率で波長変換が可能な本発明の光波長変換素子を用いることにより、半導体レーザの波長変換によっても mW オーダの高調波出力が可能となり、半導体レーザと一体化した波長可変コヒーレント光発生装置を実現することができる。波長変換素子の温度を例えばヒータやペルチェ素子等を用いて調整することで位相整合波長を調整して、出力波長を変化させることができた。なお、和周波発生および差周波発生の場合には、外部で2つの光を合波して光導波路に入射する。

【0295】(第11の実施形態) 上述した実施形態において、高効率で安定した出力が可能な光波長変換素子を実現することができた。そこで、本実施形態では、本発明の光波長変換素子を用いて短波長光源の作製を試みた。波長 850 nm 帯の半導体レーザと集光光学系と第7の実施形態において図15に示したような光波長変換素子を用いて、半導体レーザからの出射光を集光光学系により光波長変換素子の導波路端面に集光し、導波モードを励起する。そして、光波長変換素子の他の導波路端面より、波長変換された SHG 光を出射する。ここでは、変換効率が高い光波長変換素子を用いているため、出力 100 mW 程度の半導体レーザを用いて 10 mW の青色 SHG 光が得られた。400 nm 帯の波長は、印刷製版、バイオ、蛍光分光特性等の特殊計測や、光ディスク等、広い応用分野において望まれている。本実施形態による光波長変換素子を用いた短波長光源は、出力特性および安定性ともに、これらの応用分野での実用化が可能である。

【0296】なお、本実施形態では半導体レーザの光を集光光学系を用いて光導波路に結合させたが、半導体レーザと光導波路を直接結合させることも可能である。TE モード伝搬 (Transverse Electric) の光導波路を用いると、半導体レーザの導波モードと電界分布を等しくすることが可能となるため、集光レンズなしでも高効率で結合することができる。本願発明者らの実験によれば、結合効率 80 % で直接結合が可能であり、レンズ結合とほぼ同等の結合特性が得られることが確認できた。直接結合を用いると、小型で低価格の光源が実現できるので、有望である。

【0297】(第12の実施形態) 本実施形態では、本発明の光学システム 140 について説明する。図23は本実施形態の光学システム 140 の構成を示す断面図である。この光学システムは、第10の実施形態のコヒーレント光発生装置 145 を備えており、ここから出射した出力 10 mW のビームはレンズ 146 により集光され、ビームスプリッタ 147 および入/4板 157 を透過して対物レンズ 149 により情報再生媒体である光ディスク 150 に照射される。反射光は、対物レンズ 149 によりコリメートされてビームスプリッタ 147 で反射され、光検出器 148 で信号が読み取られる。さらに、コヒーレント光発生装置の出力を強度変調すること

により、光ディスク 150 に情報を書き込むことができる。

【0298】この光学システムにおいては、光波長変換素子の位相整合条件の許容度が拡大されているため、出力の安定化を図ることができ、外部の温度変化に対しても 5 % 以下の出力変動に抑えることができた。

【0299】さらに、高出力の青色光の発生が可能となるため、光ディスクの情報を読み取るだけではなく、光ディスクに情報を書き込むことも可能となった。また、半導体レーザを基本波光源として用いることで小型化することができるため、民生用として小型の光ディスク読み取り装置および記録装置にも利用することができる。

【0300】ところで、光ディスクに情報を書き込むためには、コヒーレント光発生装置の出力を変調する必要がある。本実施形態の光学システムでは、半導体レーザの出力強度を変調することにより、コヒーレント光発生装置からの出力変調を行うことができる。

【0301】さらに、光波長変換素子の光導波路幅を最適化することで、出力ビームのアスペクト比の最適化を行うことができる。例えば、3本の光導波路からなる光導波路群において高調波を中央の光導波路に伝搬させる構造とし、特に、出射部近傍では光導波路を中央の一本として、他の光導波路を途中で伝搬できないように切断する光導波路構造とすることで、出射ビームのアスペクト比を 1 : 1 に近づけることができた。これにより、光ピックアップの集光特性を向上させるためのビーム成形プリズム等が不要になり、高い伝達効率、優れた集光特性および低価格化を実現することができた。さらに、ビーム成形時に発生する散乱光のノイズを低減することができ、光ピックアップの簡素化を実現することができた。

【0302】

【発明の効果】以上に説明したように、本発明によれば、高屈折率層を有する光導波路構造において、第1のプロトン交換領域(第1のイオン交換領域)をアニール処理してグレーディッド形状にした後、第2のプロトン交換領域(第2のイオン交換領域)を形成し、これをステップライクなグレーディッド形状にすることで、耐光損傷強度の大幅な向上、波長変換効率の向上、高温時の寿命の大幅な延長、導波路伝搬損失の低減による特性の向上を実現することが可能となり、その実用効果は大きい。

【0303】また、本発明の短波長光発生装置によれば、半導体レーザの光をステップライクなグレーディッドな屈折率分布を有する高屈折率層を備えた光導波路内で波長変換することで、高出力かつ高信頼性の短波長光源が実現され、その実用効果は大きい。

【0304】更に、光導波路の製造方法として、高屈折率なクラッド層を形成するためのアニール処理として、第1のプロトン交換領域(第1のイオン交換領域)に対



するアニール処理と第2のプロトン交換領域(第2のイオン交換領域)に対するアニール処理とを異なる温度で行うことで、第2のプロトン交換領域(第2のイオン交換領域)に必要とされるグレーディッドな屈折率分布を均一に精度良く形成することが可能となり、光波長変換素子特性を大幅に向上させることが実現され、その実用効果は大きい。

【0305】本発明によれば、光導波路群からなる光導波路構造を用いることで、光導波路の低損失化を図ることができ、耐光損傷強度の大幅な向上が可能となった。さらに、光導波路群の構造を最適化することにより、変換効率の向上および集光特性の向上が可能となり、その実用効果は非常に大きい。

【0306】また、本発明によれば、プロトン交換光導波路を用いた光波長変換素子において、光導波路中のLi濃度を制御することにより、耐光損傷強度の大幅な向上が可能となり、その実用効果は非常に大きい。

【0307】また、本発明によれば、耐光損傷強度の優れた本発明の光波長変換素子を用いることで、高出力で、かつ安定した出力特性を有するコヒーレント光発生装置を実現することができ、その実用効果は非常に大きい。

【0308】さらに、本発明によれば、高出力で出力変動が小さい本発明のコヒーレント光発生装置を用いることで、ノイズの少ない光学システムを実現することができ、その実用効果は大きい。

【図面の簡単な説明】

【図1】従来の光波長変換素子の構成を示す斜視図

【図2】(a)従来の光導波路素子の構成を模式的に示す図

(b)(a)の構成における深さ方向の屈折率分布を示す図

(c)(a)の構成の中を伝搬する基本波及び高調波の深さ方向の電界分布を示す図

【図3】(a)本発明の第1の実施形態によるプロトン交換導波路(光導波路)の構成を示す断面図

(b)は、(a)の構成における深さ方向の屈折率分布を表す図

【図4】アニール処理におけるプロトンの拡散定数のアニール温度依存性を示す図

【図5】(a)～(c)に、アニール処理によるプロトン濃度分布の変化に伴った屈折率分布形状の変化の様子を示す図具体的には、(a)はステップ形状

(b)はステップライクなグレーディッド形状、(c)はグレーディッド形状

【図6】アニール処理による屈折率分布の変化を表す図

【図7】(a)第1と第2のプロトン交換層からなる導波路におけるプロトン交換率の分布

(b)プロトン交換率の分布図で第1のプロトン交換層の分布の拡大図

(c)プロトン交換率の分布図で第2のプロトン交換層の分布の拡大図

【図8】(a)～(e)本発明による光導波路の作製方法の各工程を説明するための模式的な断面図

(b)～(e)各々の工程によって得られる形状における深さ方向の屈折率分布形状

【図9】(a)本発明による光波長変換素子の斜視図

(b)そこに含まれる光導波路の断面図及び深さ方向の屈折率分布を示す図

【図10】光波長変換素子の波長変換効率及び表面屈折率と第2のプロトン交換層の深さとの関係を示す図

【図11】光波長変換素子の耐光損傷特性と第2のプロトン交換層の深さとの関係を示す図

【図12】第4の実施形態による短波長光発生装置の構成を示す図

【図13】第5の実施形態による短波長光発生装置の構成を示す図

【図14】本発明による光情報処理装置の構成を示す図

【図15】第7の実施形態の光波長変換素子の構成を示す斜視図

【図16】第7の実施形態の光波長変換素子における光導波路の断面図と光導波路を伝搬する光の電界分布を示す特性要因図

(a)基本波

(b)変換された波長光

【図17】第7の実施形態の光波長変換素子の他の構成を示す斜視図

【図18】(a)第7の実施形態の光波長変換素子における他の光導波路構成を示す平面図

(b)第7の実施形態の光波長変換素子における他の光導波路構成を示す平面図

【図19】第8の実施形態の光波長変換素子の構成を示す斜視図

【図20】第9の実施形態の光波長変換素子における耐光損傷強度とプロトン交換層内のLi mol濃度比の関係を表す特性要因図

【図21】第9の実施形態の光波長変換素子における耐光損傷強度と、プロトン交換層内のLi mol濃度比Yおよび添加金属mol濃度Zの和Y+Zとの関係を表す特性要因図

【図22】第10の実施形態のコヒーレント光発生装置の構成を示す斜視図

【図23】第12の実施形態の光学システムの構成を示す断面図

【図24】(a)従来の光波長変換素子の一構成例を示す斜視図

(b)(a)の波長変換素子に入射される基本波P1が高調波P2に変換される様子を模式的に示す図

【図25】(a)従来の他の光波長変換素子の構成を示す斜視図



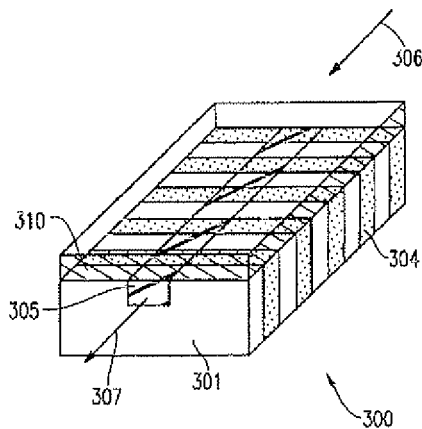
(b) (a) の波長変換素子に入射される基本波P1の光導波路への閉じ込めの様子を模式的に示す図

【図26】従来の光波長変換素子の構成を示す斜視図

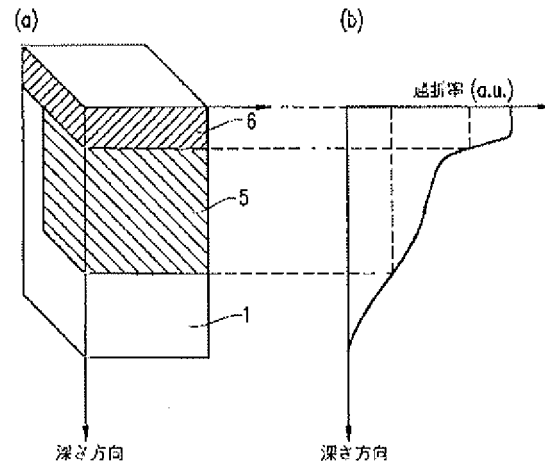
【符号の説明】

- |  |                    |
|--|--------------------|
| 1 基板                                   | 147 偏光ビームスプリッタ     |
| 2 光導波路                                 | 148 光検出器           |
| 4 高屈折率層                                | 149 対物レンズ          |
| 5 第1のプロトン交換領域                          | 150 光ディスク          |
| 6 第2のプロトン交換領域                          | 151 光導波路           |
| 7 分極反転領域(分極反転構造)                       | 153 高調波            |
| 15 短波長光発生装置(短波長光源)                     | 300 従来の光波長変換素子     |
| 20 支持部材                                | 301 基板             |
| 21 半導体レーザ                              | 304 分極反転領域(分極反転構造) |
| 22 光波長変換素子                             | 305 光導波路           |
| 24 集光光学系                               | 306 基本波            |
| 25 集光光学系                               | 307 第2高調波          |
| 60 光波長変換素子                             | 310 高屈折率層          |
| 101 基板                                 | 400 短波長光発生装置       |
| 102 分極反転領域                             | 420 Siマウント         |
| 103 光導波路群                              | 402 光導波路           |
| 103a、103b、103c、103d、103e、<br>103f 光導波路 | 403 第2のプロトン交換領域    |
| 104、152 基本波                            | 421 半導体レーザ         |
| 105 高調波または和周波                          | 422 光波長変換素子        |
| 105a パラメトリックまたは差周波                     | 500 光情報処理装置        |
| 106、123 入射部                            | 520 短波長光発生装置       |
| 107、124 出射部                            | 521 半導体レーザ         |
| 121 光波長変換素子                            | 522 光波長変換素子        |
| 122 半導体レーザ                             | 540 コリメータレンズ       |
| 145 コヒーレント光発生装置                        | 541 ビームスプリッタ       |
| 146 レンズ                                | 542 レンズ            |
|  | 543 光ディスク          |
|  | 544 レンズ            |
|  | 545 ディテクタ          |
|  | 600 従来の光波長変換素子     |
|  | 640 従来の光波長変換素子     |

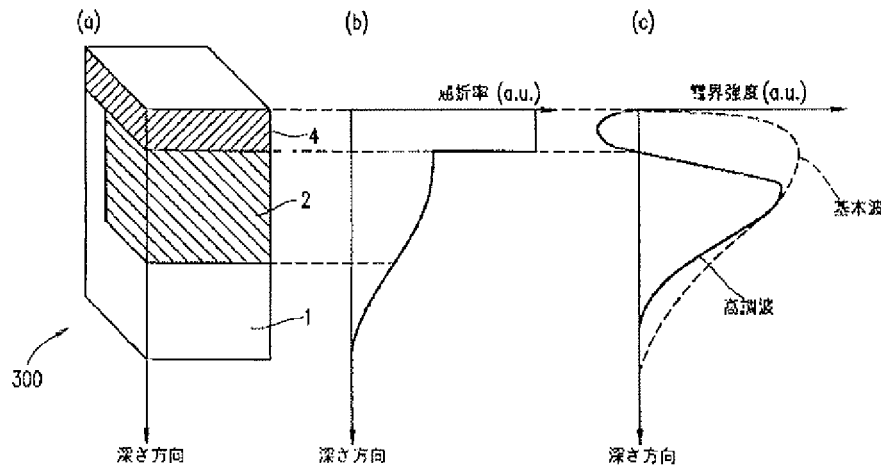
【図1】



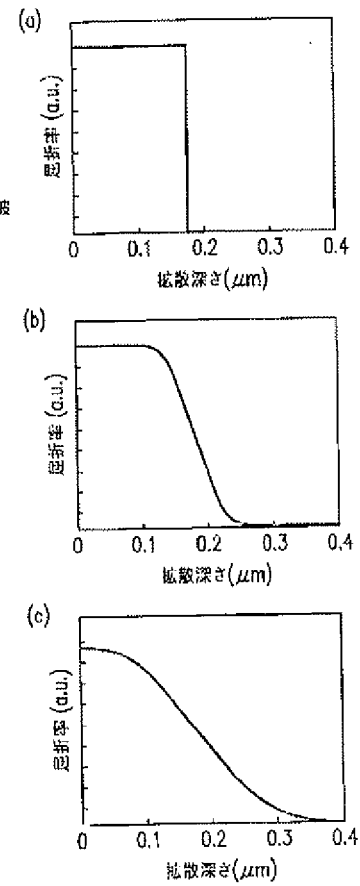
【図3】



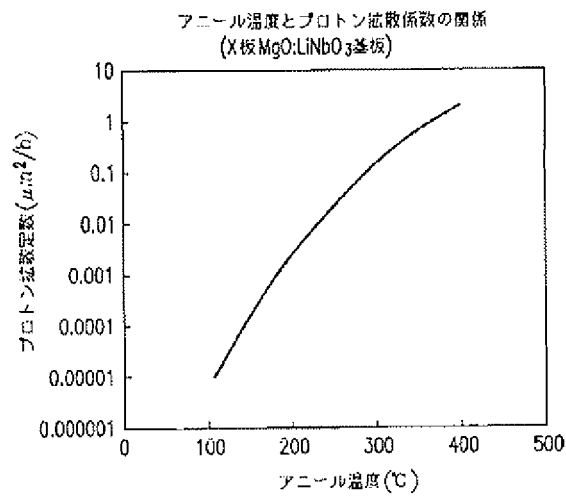
【図2】



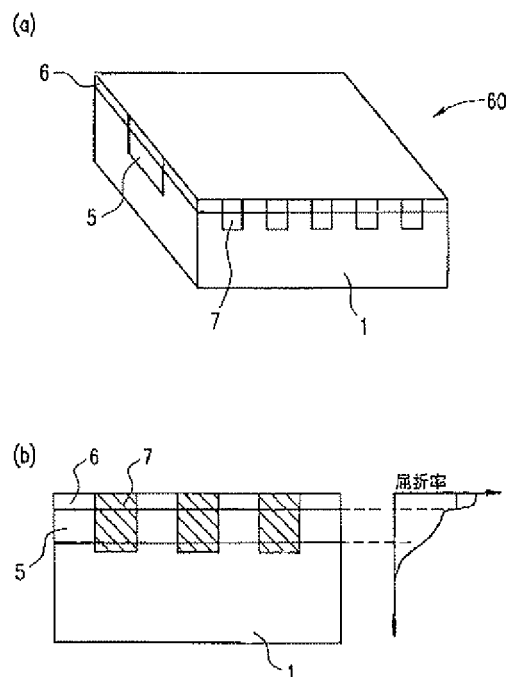
【図5】



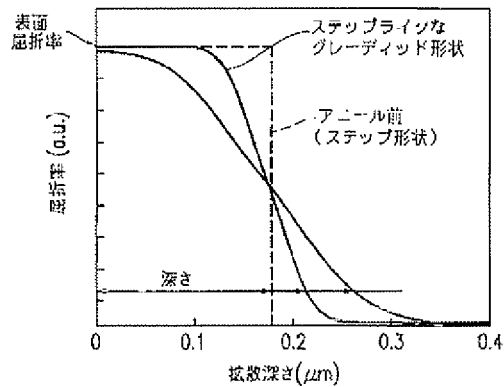
【図4】



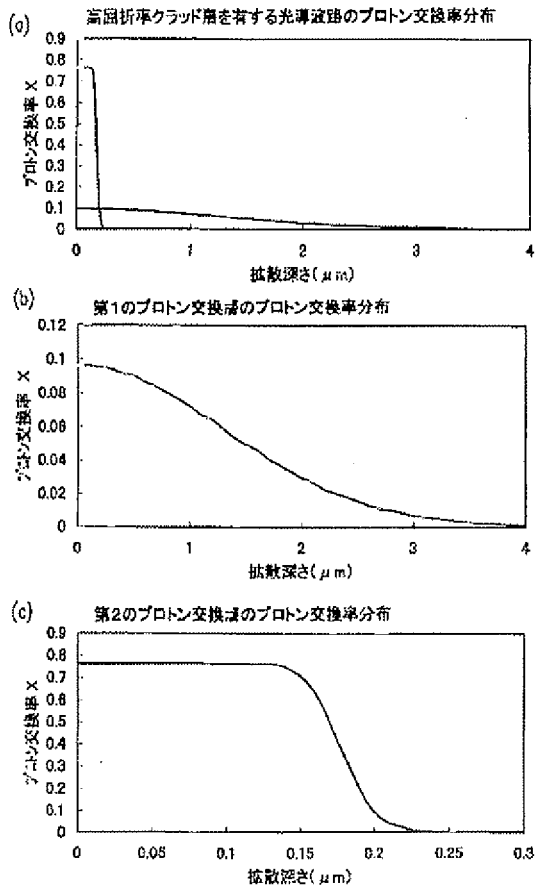
【図9】



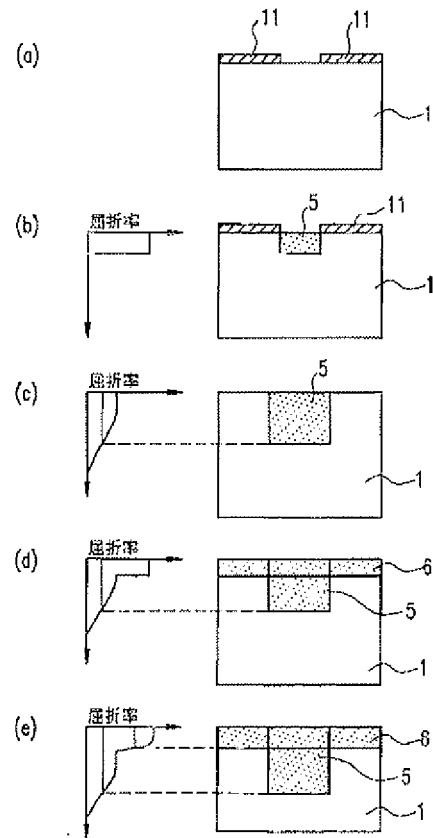
【図6】



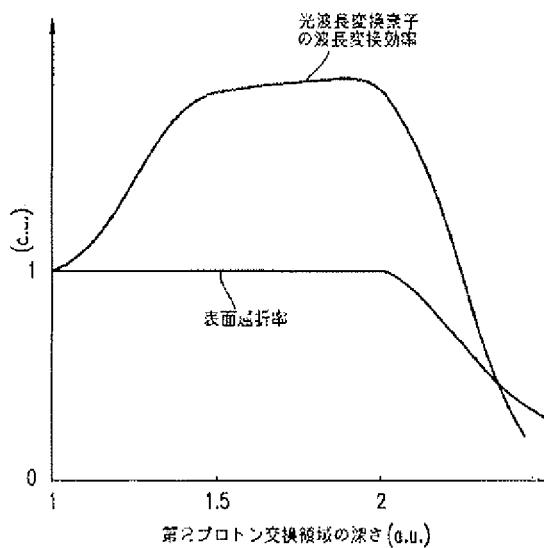
【図7】



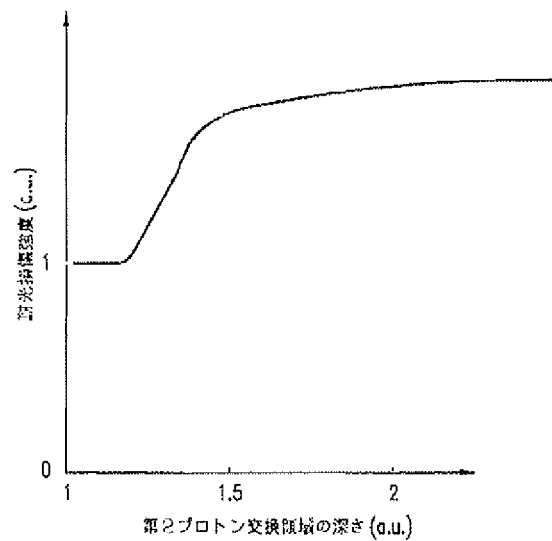
【図8】



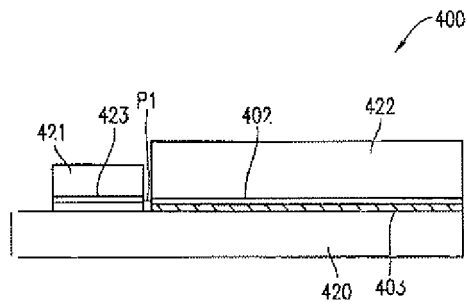
【図10】



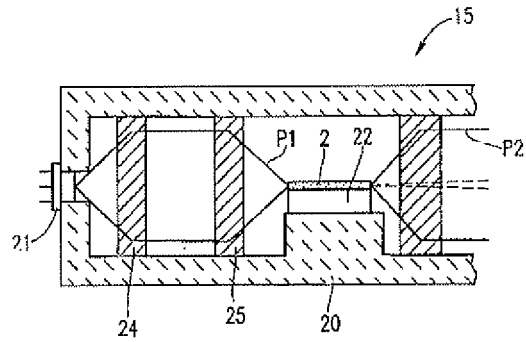
【図11】



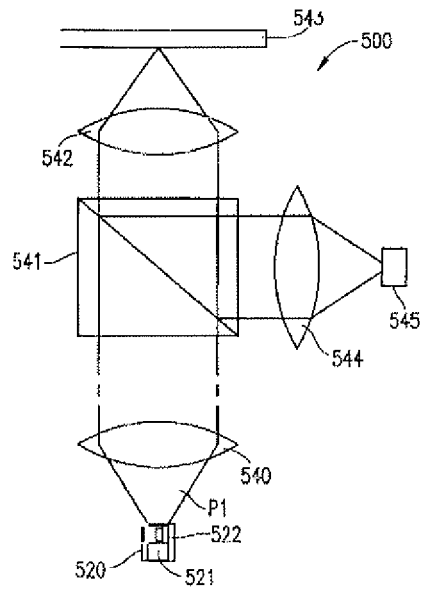
【図12】



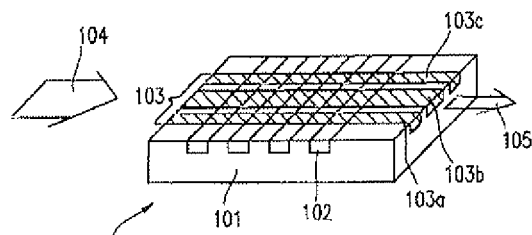
【図13】



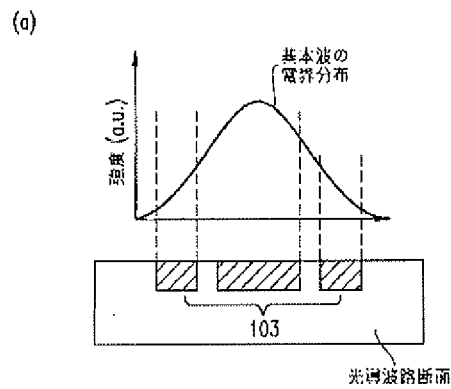
【図14】



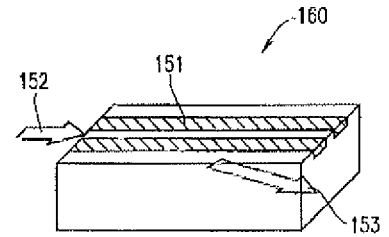
【図15】



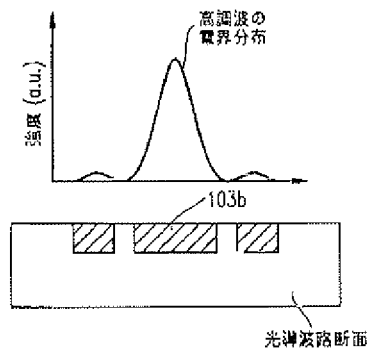
【図16】



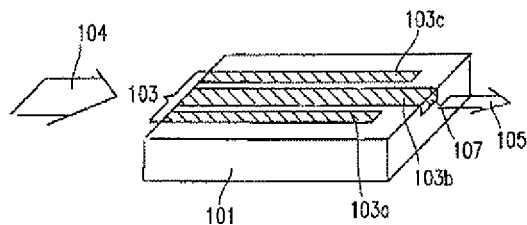
【図26】



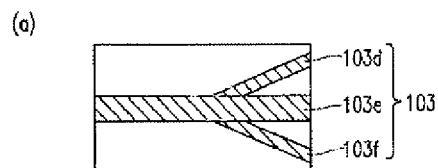
(b)



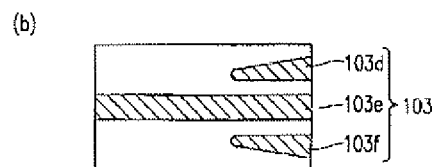
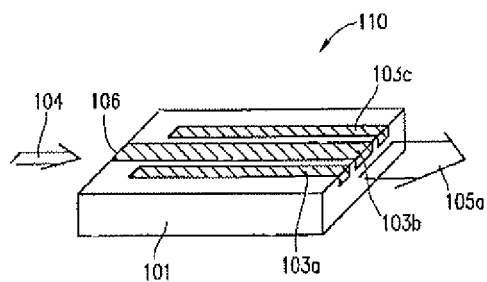
【図17】



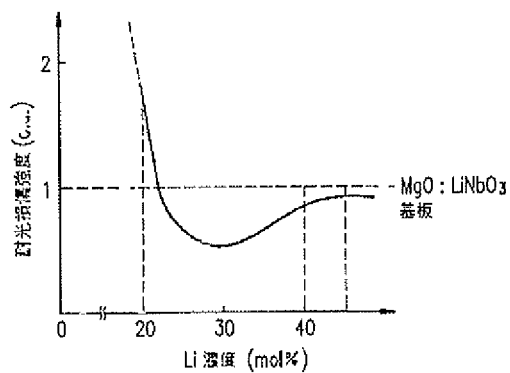
【図18】



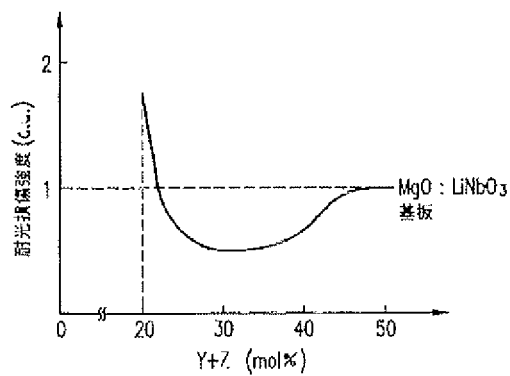
【図19】



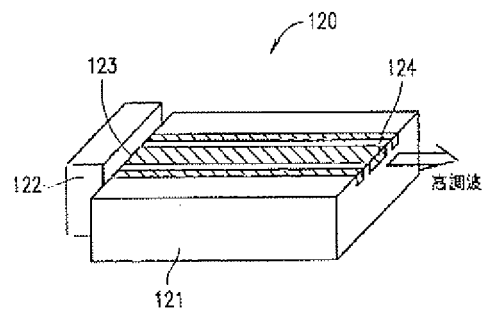
【図20】



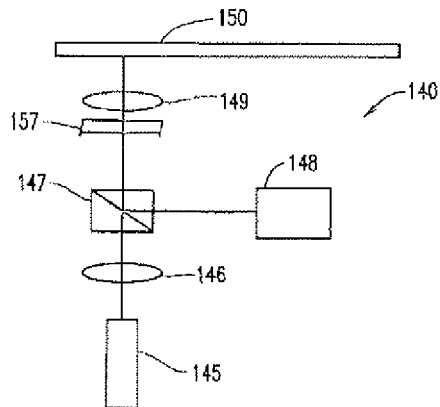
【図21】



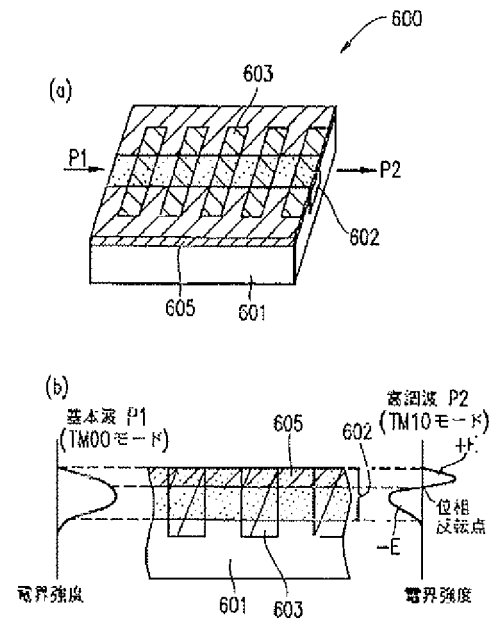
【図22】



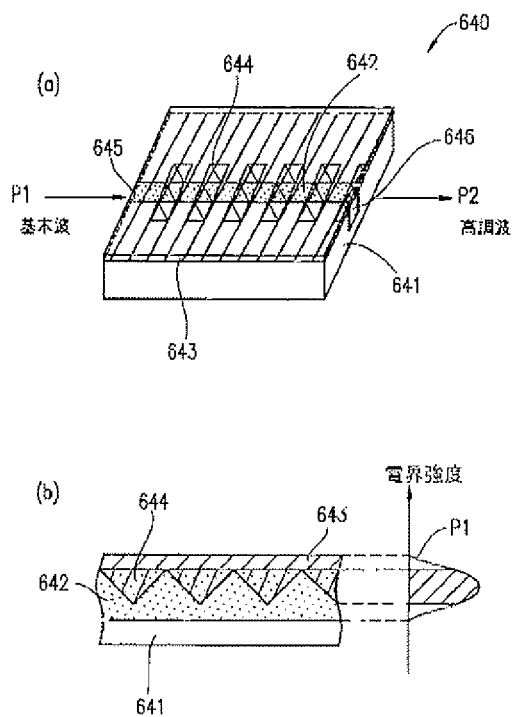
【図23】



【図24】



【図25】



フロントページの続き

(72)発明者 北岡 康夫  
大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

(72)発明者 横山 敏史  
大阪府門真市大字門真1006番地 松下電器  
産業株式会社内

Fターム(参考) 2H047 KA04 KA13 LA00 LA02 PA12  
PA13 QA03  
2K002 AA01 AA04 AB12 CA03 DA06  
EA04 FA24 FA28 HA20  
5D119 AA01 AA43 HA64 JA29 JA36  
NA05